

Perttu Nieppo

Transienttien simulointi suuritehoisessa aurinkosähköinvertterissä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

10.11.2017

Tekijä Otsikko	Perttu Nieppo Transienttien simulointi suuritehoisessa aurinkosähköinvertterissä
Sivumäärä Aika	47 sivua + 1 liite 10.11.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Jukka Karppinen Principal EMC Engineer Kari Ahlskog
<p>Insinööriyön aiheena oli simuloida suuritehoisen aurinkosähköinvertterin EMC-testausta. Simuloitavat testit olivat IEC-standardien 61000-4-4 ja 61000-4-5 mukaiset transienttipurskeen ja syöksyaallon testit. Työ tehtiin ABB Oy:n Solar-yksikön toimeksiantona. Tarkoituksena oli luoda simulaatiomalli häiriögeneraattorille sekä aurinkosähköinvertterin häiriösuojalaitteille. Tavoitteena oli simuloinnin kautta ymmärtää, miten eri suojalaitteet vaikuttavat häiriösignaaliin ja laitteen suojaukseen.</p> <p>Simulointi onnistuttiin suorittamaan ja eri komponentit mallintamaan. Muuntajan, EMI-suodatinkorttien, ylijännitesuojien sekä LCL:n vaikutus häiriönsuodatuksessa selvisi. Muuntaja toimii vaimentavana komponenttina kaikenlaisille transienttihäiriöille. EMI-suodatinkortit suojaavat nopean transienttipurskeen kaltaisilta häiriöiltä. Ylijännitesuojat vaimentavat syöksyaallon kaltaisia häiriöitä. LCL vaimentaa häiriöt täysin.</p> <p>Simuloituja tuloksia verifioitiin rakentamalla mittausjärjestely testejä varten. Mittauksista saatiin selville eri komponenttien toimintaa. Komponentit toimivat jossain määrin kuten simulaatiossa.</p> <p>Simulointimalleja voidaan käyttää häiriösuojalaitteiden alustavaan verifiointiin ja toiminnan tutkimiseen ennen varsinaisten testien suorittamista.</p>	
Avainsanat	EMC, simulaatio, transientti, invertteri

Author Title	Perttu Nieppo Simulation of Transients in a High-power Photovoltaic Inverter
Number of Pages Date	47 pages + 1 appendix 10 November 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Professional Major	Electrical power engineering
Instructors	Jukka Karppinen, Senior Lecturer Kari Ahlskog, Principal EMC Engineer
<p>The subject of this study was to simulate EMC testing of a high-power photovoltaic inverter. The simulated tests were electrical fast transient/burst test and surge test according to IEC standards 61000-4-4 and 61000-4-5. The study was assigned by ABB Solar. The aim was to create a simulation model for the interference generator and interference protection devices inside the photovoltaic inverter. The objective was to understand the effects of interference protection devices on interference signal and on protection of the device through simulation.</p> <p>The simulation was accomplished, and the different components were modeled. The effects of the transformer, EMI filtering cards, surge protectors and LCL in interference filtering were resolved. The transformer works as a suppressing component for all sort of transient interference. EMI filtering cards protect against interference, such as the electrical fast transient/burst. Surge protectors suppress the effects of surge type interference. LCL can suppress the interferences entirely.</p> <p>Simulated results were verified by building test setups for the tests. The results of the measurements showed the behavior of the different components. Components behave to some extent according to the simulation.</p> <p>The simulation models may be used for initial verification of the interference protection devices, as well as to examine their operation before proper test execution.</p>	
Keywords	EMC, Simulation, Transient, Inverter

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	2
2.1	Maxwellin yhtälöt	2
2.2	Sähkömagneettinen häiriö	3
2.3	Immunitteettitestit	3
3	Suuritaajuisten johtuvien häiriöiden testit	4
3.1	Nopean transienttipurskeen testi	4
3.2	Syöksyaallon testi	7
4	EMC-testauslaitteisto	11
5	Simulaatio	14
5.1	Nopean transienttipurskeen testin simulointi	15
5.2	Syöksyaallon testin simulointi	26
6	Simulaation verifiointi	38
6.1	Syöksyaallon mittaus	38
6.2	Nopean transienttipurskeen mittaus	43
7	Yhteenveto	46
	Lähteet	48

Liitteet

Liite 1. Pulssimuodon funktion määrittäminen

Lyhenteet

EMC	Electromagnetic Compatibility; Sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic Interference; Sähkömagneettinen häiriö
EUT	Equipment Under Test; Testattava laite
HEMP	High Altitude Electromagnetic Pulse; Korkean altitudin sähkömagneettinen pulssi
LCL	Induktanssi-kapasitanssi-induktanssi -suodatin

1 Johdanto

Insinööriytyö on toteutettu ABB Oy:n Solar-yksikön toimeksiantona. Insinööriytyön tarkoituksena on simuloida suuritehoisen aurinkosähköinvertterin EMC-testausta. Simuloitavat testit ovat IEC 61000-4-4:n mukainen transienttipurskeen sietotesti sekä IEC 61000-4-5:n mukainen syöksyaallon sietotesti. Simulaatiomalliin sisällytetään häiriögeneraattori, häiriögeneraattorin ja testattavan laitteen (EUT) välinen kytkentäverkko, testattavana laitteena olevan aurinkosähköinvertterin sisäiset häiriönsuodattimet sekä aurinkosähköinvertterin ja keskijänniteverkon välissä oleva muuntaja.

Insinööriytyön tavoitteena on selvittää eri suojalaitteiden vaikutus häiriösignaaliin. Analysoimalla signaalia eri suojalaitteiden vaikutuksen jälkeen voidaan ymmärtää yksittäisten komponenttien toimintaa ja mahdollisuuksia erityyppisten häiriöiden suodatuksessa.

Simulointiohjelmistona käytetään LTSpice-ohjelmaa, joka on ilmaisohjelma. LTSpice kuuluu SPICE-simulointiohjelmistoihin, jotka ovat yleisesti käytettyjä simulaattoreita analogisten elektroniikkapiirien toiminnan tutkimisessa.

Työssä kerrotaan aluksi yleisesti sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (EMC) sekä immuniteettitesteistä. Seuraavaksi kirjoitetaan simuloitavien testien vaatimuksista. Lisäksi kerrotaan EUT:n häiriöitä suodattavien komponenttien vaatimuksista ja ominaisuuksista sekä itse komponenteista. Lopuksi mallinnetaan eri komponentteja simulaatio-ohjelmaan ja suoritetaan simuloituja testejä. Testien tuloksista selvitetään suodattimien vaikutus häiriönvaimennukseen ja laitteen suojaukseen. Simuloituja tuloksia verrataan mitattuihin tuloksiin ja analysoidaan simulaation todenpitävyyttä.

Jatkossa simulaatiomallipohjaa voidaan käyttää verifioimaan alustavasti erilaisten komponenttien toimintaa.

2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

2.1 Maxwellin yhtälöt

Kaikki sähkömagneettisten kenttien klassiset ilmiöt voidaan johtaa Maxwellin yhtälöistä [1]:

$$\text{Gaussin laki:} \quad \tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{D} = r_f \quad (1)$$

$$\text{Magneettikentän lähteettömyys:} \quad \tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Faradayn induktiolaki:} \quad \tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt \quad (3)$$

$$\text{Yleistetty Ampèren laki:} \quad \tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_f + d\mathbf{D}/dt \quad (4)$$

\mathbf{D} on sähkövuon tiheys,

r_f on varaustiheys,

\mathbf{B} on magneettivuon tiheys,

\mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus,

\mathbf{H} on magneettikentän voimakkuus

\mathbf{j}_f on sähkövirran tiheys.

Gaussin laki kuvaa miten sähkövaraus tuottaa sähkökentän.

Magneettikentän lähteettömyyden yhtälö kertoo, että magneettisista kenttäviivoista muodostuu aina suljettuja silmukoita.

Faradayn induktiolaki kuvaa sähkökentän muodostumisen muuttuvasta magneettikentästä.

Yleistetty Ampèren laki kuvaa sähkövirran ja muuttuvan sähkökentän tuottaman magneettikentän.

Maxwellin yhtälöiden pohjalta voidaan ymmärtää millä eri tavoilla sähkölaitteet voivat vaikuttaa toisiinsa.

2.2 Sähkömagneettinen häiriö

Sähkömagneettinen häiriö eli EMI (electromagnetic interference) on kasvava saaste ympäristössä. Erilaiset EMI:n muodot voivat aiheuttaa sähköisiä ja elektronisia toimintahäiriöitä. Elektronisten järjestelmien yleistyessä EMI:n aiheuttamat riskit kasvavat. [2, s. 1.]

EMI syntyy joko sähkölaitteiden aiheuttamana erilaisista elektronisista piireistä ja suurivirtaisista kytkimistä tai luonnosta esimerkiksi salaman aiheuttamana. EMI voi olla jatkuvaa häiriötä tai impulssimaista. [3.]

EMI voi kytkeytyä sähkölaitteeseen neljällä eri tavalla [3]:

- säteilemällä, kun lähde lähettää kohdetta haittaavaa säteilyä kohteeseen
- johtumalla, kun lähde ja kohde ovat kytkettyinä teho- tai signaalijohtimien kautta
- kapasitiivisesti, jos lähteen muuttuva jännite siirtää varausta kapasitiivisesti kohteeseen
- induktiivisesti, jos muuttuva magneettikenttä on olemassa lähteen ja kohteen välillä.

Sähkölaitteen on toimittava oikein muiden laitteiden kanssa sille tarkoitetussa toimintaympäristössä. Sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC (electromagnetic compatibility) takaa häiriöttömän toiminnan samaan käyttöympäristöön tarkoitetuille laitteille. Sähkölaitteen tulee sietää riittävästi muiden laitteiden aiheuttamia häiriöitä eikä se saa itse lähettää kohtuuttomasti häiriöitä ympäristöönsä. [4.]

2.3 Immuneettitestit

Immuneettitestauksessa testattava laite altistetaan sähkömagneettisille ilmiöille. EMC-immuneettitestit ovat testattavan laitteen altistamista joko jatkuvalle häiriölle, jolloin sähkömagneettisen ilmiön kesto on minuuteista tunteihin tai hetkelliselle eli transienttihakäiriölle, jolloin transientti-ilmiön kesto on nanosekunneista mikrosekunneihin. [5.]

IEC 61000-4 jakaa immunitetestit kuuteen luokkaan:

- Pienitaajuiset johtuvat häiriöt
- Pienitaajuiset säteilevät häiriöt
- Suuritaajuiset johtuvat häiriöt
- Suuritaajuiset säteilevät häiriöt
- Sähköstaattiset purkaukset
- Korkean altitudin sähkömagneettinen pulssi (HEMP).

Tässä työssä simuloitavat nopean transienttipurskeen ja syöksyaallon testit kuuluvat suuritaajuisen johtuvien häiriöiden testeihin.

3 Suuritaajuisen johtuvien häiriöiden testit

3.1 Nopean transienttipurskeen testi

IEC 61000-4-4 määrittää nopean transienttipurskeen immunitestit. Testi koostuu nopeiden transienttien purskeista, jotka johdetaan EUT:n teho-, kontrolli-, signaali- ja maadoitusportteihin. Testissä korostuu transienttien suuri amplitudi, lyhyt nousuaika, suuri toistumistaajuus sekä pieni energia. [6, s. 10.]

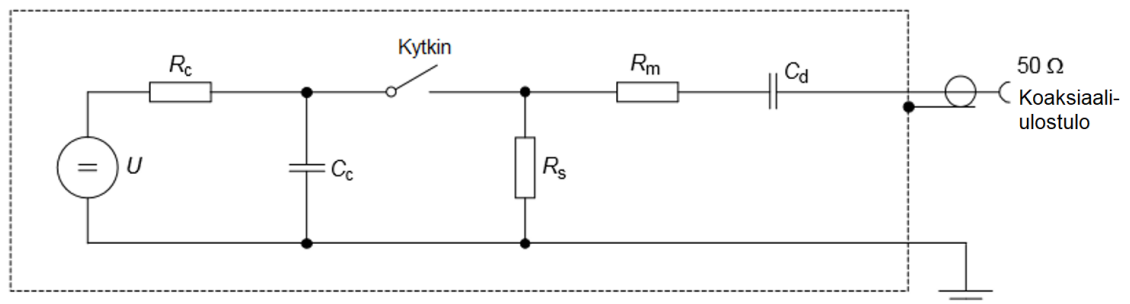
Testistä selviää EUT:n immunitetti transienttihäiriöille jotka ovat lähtöisin kytkentätransienteista [6, s. 10].

Standardi määrittää neljä eri tasoa nopean transienttipurskeen generaattorin tuottamille jännitteille. Tasot on määritetty taulukossa 1. Taulukosta nähdään myös eri jännitetasot teho- ja maadoitusliittimille sekä signaali- ja kontrolliliittimille. Myös toistumistaajuudet transienttipurskeille on määritetty taulukossa.

Taulukko 1. Nopean transienttipurskeen generaattorin tuottamat jännitetasot ja toistumistaajuus [6, s. 11].

Avoimen piirin testijännite ja impulssien toistumistaajuus				
Taso	Teholiittimet, maadoitusliitin		Signaali- ja kontrolliliittimet	
	Jännitepiikki kV	Toistumistaajuus kHz	Jännitepiikki kV	Toistumistaajuus kHz
1	0,5	5 tai 100	0,25	5 tai 100
2	1	5 tai 100	0,5	5 tai 100
3	2	5 tai 100	1	5 tai 100
4	4	5 tai 100	2	5 tai 100
X	Erikseen määritetty	Erikseen määritetty	Erikseen määritetty	Erikseen määritetty

Nopean transienttipurskeen generaattorin yksinkertaistettu piirikaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Nopean transienttipurskeen generaattorin yksinkertaistettu piirikaavio [6, s. 12].

U on suurjännitelähde

R_c on latausvastus

C_c on energian varastointi -kondensaattori

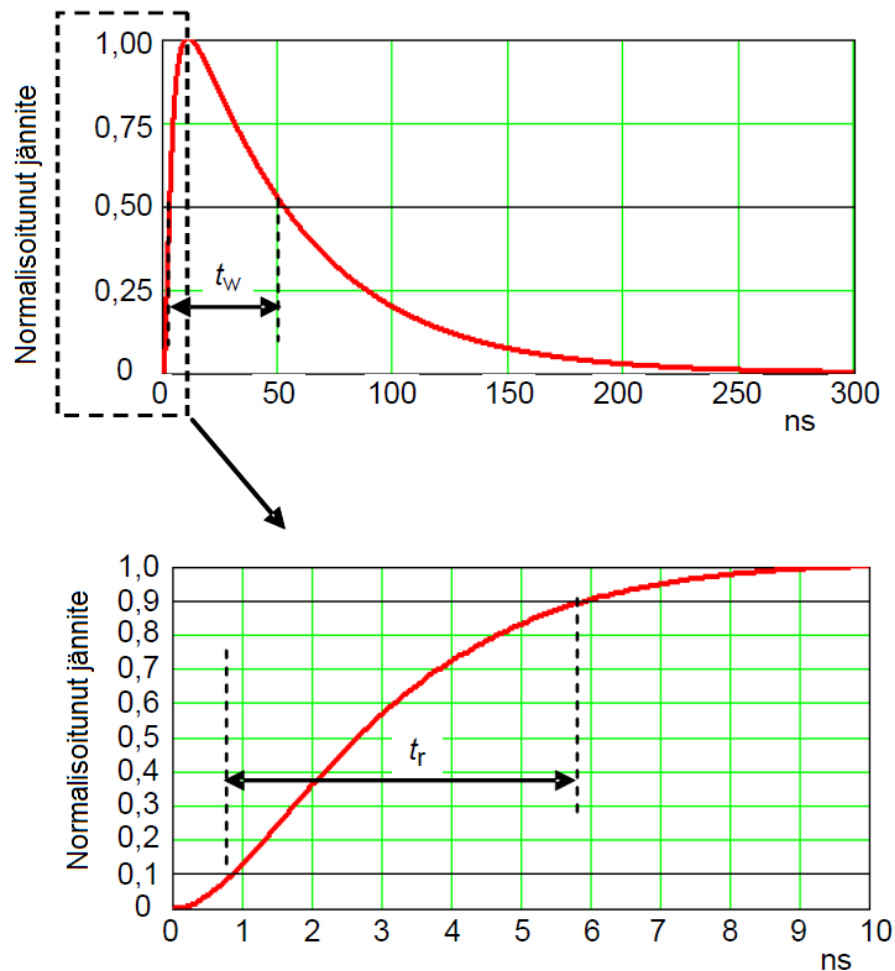
R_s on impulssin pituutta muotoileva vastus

R_m on impedanssia vastaava vastus

C_d on tasavirran estävä kondensaattori

Kytkimenä on suurjännitekytkin.

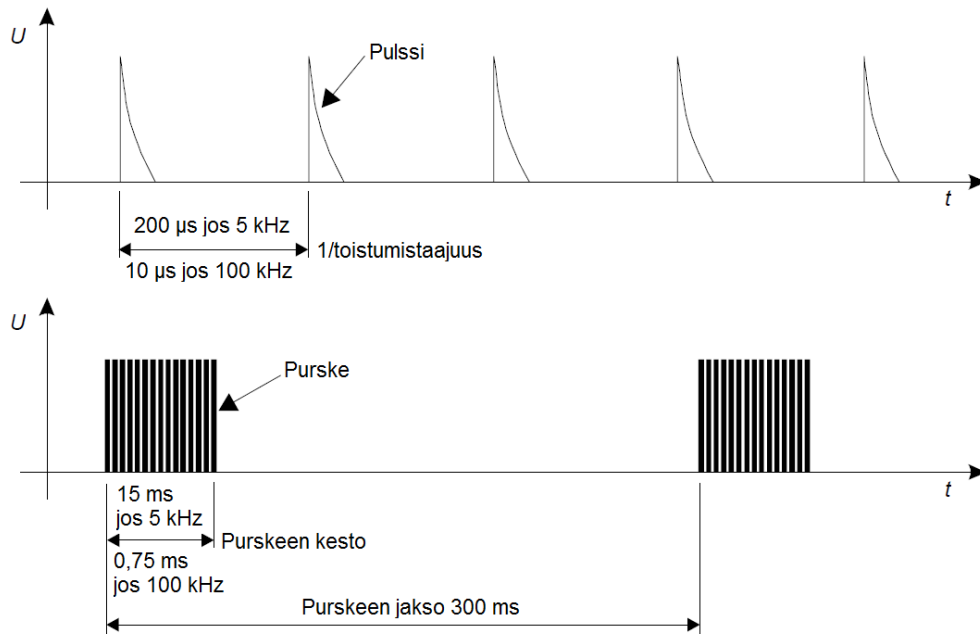
Nopean transienttipurskeen generaattori tuottaa pulssimaista jännitettä. Yksittäisen pulssin nousuaika on 5 ns. Pulssin leveys on 50 ns. Yksittäisen pulssin pulssimuotoa sekä nousuaikaa t_r ja pulssin leveyttä t_w on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Nopean transienttipurskeen generaattorin tuottaman signaalin pulssimuoto [6, s. 13].

Ideaalin pulssimuodon jännitteen funktio on määritetty liitteessä 1.

Generaattori tuottaa pulsseja tietyllä toistumistaajuudella (taulukon 1 mukaisesti). Pulseja tuotetaan määritetyn purskeen keston ajan. Nämä purskeet toistuvat 300 ms:n välein. Kuvassa 3 on havainnollistettu pulssien toistumistaajuutta sekä purskeiden kestoja ja jaksoja.



Kuva 3. Nopean transienttipurskeen generaattorin tuottamien pulssien toistumistaajuus sekä pulssien muodostamien purskeiden kesto aika [6, s. 13].

3.2 Syöksyaallon testi

IEC 61000-4-5 määrittää syöksyaallon immunitetestin. Testigeneraattorin tarkoituksena on simuloida kahdenlaisia transientti-ilmiöitä: tehojärjestelmien kytkentätransientteja sekä salamatransientteja. [7, s. 13–14.]

Tehojärjestelmien kytkentätransientit voidaan jakaa transientteihin jotka liittyvät

- suuriin tehojärjestelmän kytkentähäiriöihin, kuten kondensaattoripankin kytkentöihin
- pieneen paikalliseen kytkentätapahtumaan tai kuorman muutokseen tehonsyöttöjärjestelmässä
- kytkentälaitteiden resonanssipiireihin
- erilaisiin järjestelmävikoihin, kuten oikosulkuihin ja valokaarivikoihin kytkennän maadoitusjärjestelmään.

Tavat joilla salama voi tuottaa syöksyaaltojännitteitä ovat:

- suora salamanisku ulkoiseen piiriin josta aiheutuu virran aiheuttamia jännitteitä

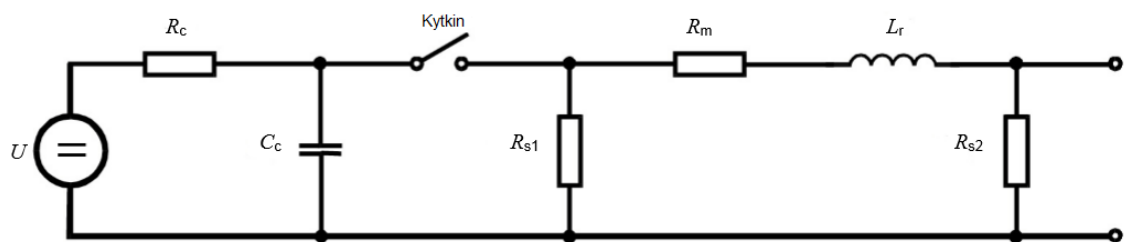
- epäsuora salamanisku joka indusoi virtoja tai jännitteitä johtimiin
- salaman aiheuttamat virrat maadoitusjärjestelmässä.

Standardi määrittää neljä eri tasoa syöksyaaltogeneraattorin tuottamille jännitteille. Tasot on määritetty taulukossa 2. Taulukossa on ilmoitettu eri jännitetasot vaiheiden välillä sekä vaiheesta maahan.

Taulukko 2. Syöksyaaltogeneraattorin tuottamat jännitetasot [7, s. 15].

Taso	Avoimen piirin testijännite kV	
	Vaiheesta vaiheeseen	Vaiheesta maahan
1	-	0,5
2	0,5	1
3	1	2
4	2	4
X	Erikseen määritetty	Erikseen määritetty

Syöksyaaltogeneraattorin yksinkertaistettu piirikaavio on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Syöksyaaltogeneraattorin yksinkertaistettu piirikaavio [7, s. 16].

U on Suurjännitelähde

R_c on Latausvastus

C_c on Energian varastointi -kondensaattori

R_{s1} ja R_{s2} ovat impulssin pituutta muotoilevia vastuksia

R_m on Impedanssia vastaava vastus

L_r on Nousuaikaa muotoileva induktanssi.

Syöksyaallon generaattorille on määritetty pulssimuoto sekä avoimen piirin jännitteelle, että oikosuljetun piirin virralle. Pulssimuotojen etuaika sekä kesto on määritetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Syöksyaaltogeneraattorin tuottaman signaalin eri vaiheiden kestoajat [7, s. 17].

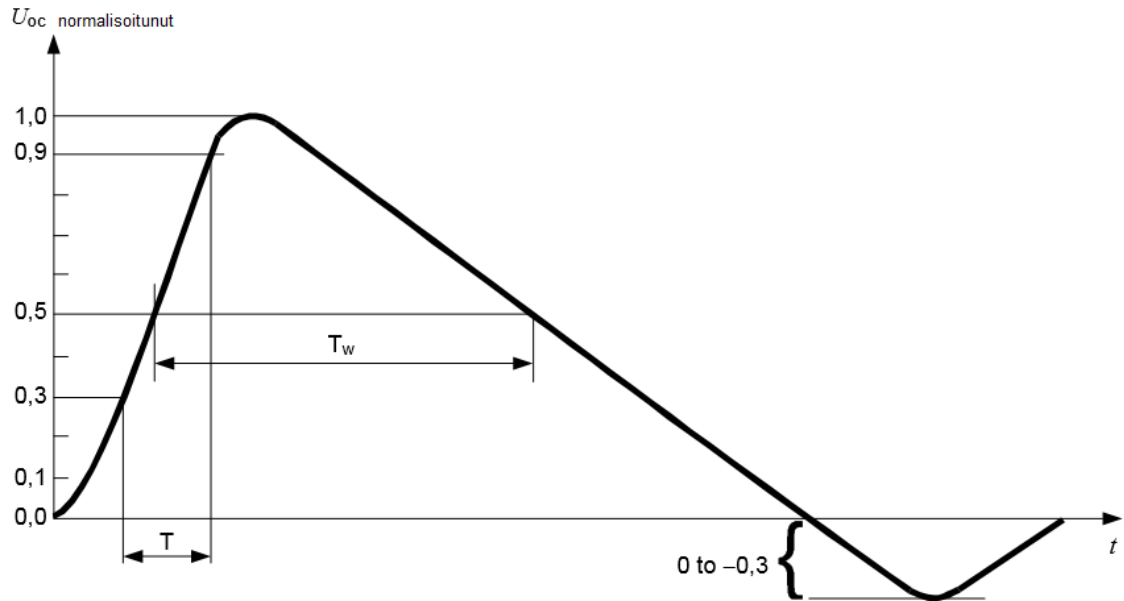
	Etuaika T_f μs	Kesto T_d μs
Avoimen piirin jännite	$T_f = 1,67 \times T = 1,2 \pm 30 \%$	$T_d = T_w = 50 \pm 20 \%$
Oikosuljetun piirin virta	$T_f = 1,25 \times T_r = 8 \pm 20 \%$	$T_d = 1,18 \times T_w = 20 \pm 20 \%$

Standardi määrittää taulukon 3 aikaparametrit seuraavasti [7, s. 53]:

- T_w on pulssinleveys välillä, jossa signaalin arvo on yli 50 % huipusta.
- T on syöksyjännitteen nousuaika, kun signaalin arvo on välillä 30 % ja 90 % nousevalla reunalla.
- T_r on syöksyvirran nousuaika, kun signaalin arvo on välillä 10 % ja 90 % nousevalla reunalla.
- T_d on aika minimiarvon ja 50 % laskeneen reunan välillä.
- T_f on etuaika, jolloin signaali on välillä 0 % ja 100 % nousevalla reunalla.

Ideaalin pulssimuodon jännitteen funktio on määritetty liitteessä 1.

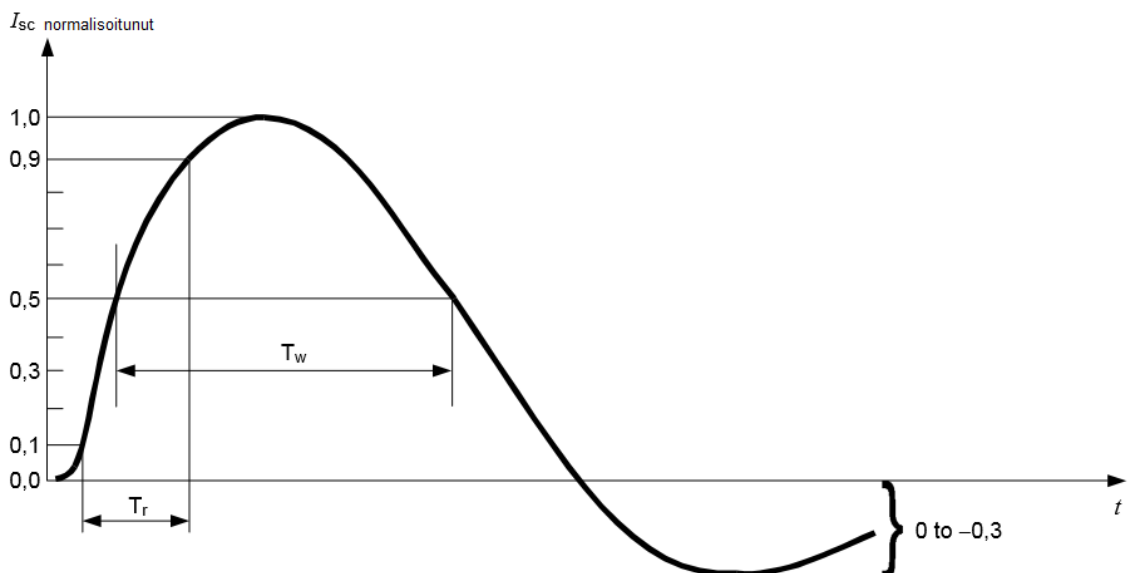
Avoimen piirin jännitteen pulssimuodon etuajaksi on määritetty 1,2 μs . Pulssinleveydeksi on määritetty 50 μs . Pulssimuotoa on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Syöksyaaltogeneraattorin tuottaman jännitteen pulssimuodon aikaparametrit avoimessa piirissä [7, s. 17].

Ideaalin pulssimuodon virran funktio on määritetty liitteessä 1.

Oikosuljetun piirin virran pulssimuodon etuajaksi on määritelty $8\ \mu\text{s}$. Pulssinleveydeksi on määritelty $20\ \mu\text{s}$. Oikosuljetun piirin virran pulssimuotoa on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Syöksyaaltogeneraattorin tuottaman virran pulssimuodon aikaparametrit oikosuljetussa piirissä [7, s. 18].

4 EMC-testauslaitteisto

KytKentäverkko

Nopean transienttipurskeen testissä kytkentä-/erotusverkkoa käytetään teholiittimiin kohdistuvissa testeissä. KytKentä-/erotusverkon muodostavat tyypillisesti seuraavat komponentit [6, s. 15]:

- erotusinduktanssi ferriitillä $>100 \mu\text{H}$;
- kytkentäkondensaattorit 33 nF .

Syöksyaallon testissä kytkentä-/erotusverkkoa käytetään kaikkiin liittämiin kohdistuvissa testeissä [7, s. 19].

Syöksyaallon testin kytkentäverkon impedanssi on [7, s. 21]:

- vaiheesta vaiheeseen testeissä $18 \mu\text{F}$
- vaiheesta maahan testeissä $9 \mu\text{F} + 10 \Omega$.

Syöksyaallon testissä yli 200 ampeerin EUT:n kytkentä-/erotusverkon komponentit ovat määritetty standardin erillisessä liitteessä [7, s. 22].

Suurivirtaisten EUT:iden erotusinduktanssi on määritetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Syöksyaallon testin suositeltu erotusinduktanssi suurilla EUT:n nimellisvirroilla [7, s. 73].

EUT:n nimellisvirta	Suosittelut erotusinduktanssi
$200 \text{ A} < \text{nimellisarvo} \leq 400 \text{ A}$	$200 \mu\text{H} - 100 \mu\text{H}$
$400 \text{ A} < \text{nimellisarvo} \leq 800 \text{ A}$	$100 \mu\text{H} - 50 \mu\text{H}$
$800 \text{ A} < \text{nimellisarvo} \leq 1600 \text{ A}$	$50 \mu\text{H} - 25 \mu\text{H}$
$I [\text{Ampeeria}] < \text{nimellisarvo} \leq 2 \times I$	Induktanssi pienenee kahden kertoimella

Muuntaja

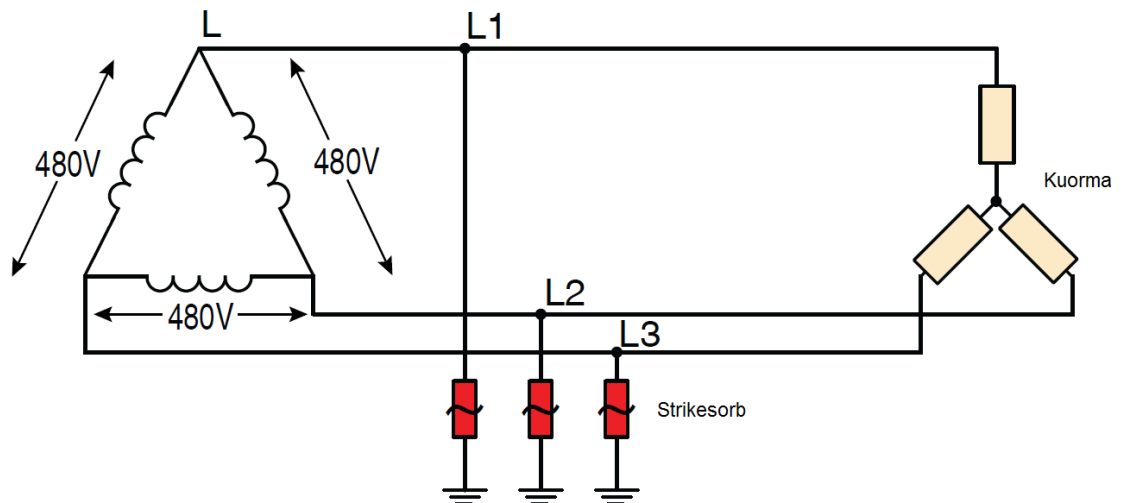
Aurinkoinvertterilaitteistossa käytetään muuntajaa pien- ja keskijänniteverkon välissä. Aurinkoinvertteri tuottaa pienjännitteistä sähköä joka muunnetaan siirtoa varten keskijännitteiseksi. Muuntajan transienttienvaimennuskyky perustuu siinä olevaan induktanssiin. Testauksessa voidaan käyttää EMC-muuntajaa, jonka ensiön ja toision jännitteet ovat samat.

Ylijännitesuoja

EUT:ssä käytetään ylijännitesuojana Raycapin valmistamaa Strikesorbia. Valmistaja tarjoaa Spice-simulaatiomallin valmiiksi.

Strikesorbit on mahdollista kytkeä esimerkiksi vaiheiden välille tai vaiheista maahan [8, s. 7].

Kuvassa 7 on kuvattu esimerkkikytkentä kolmivaiheisesta nollajohdottomasta järjestelmästä 480 voltin pääjännitteellä, jossa Strikesorbit on kytketty vaiheista maahan.

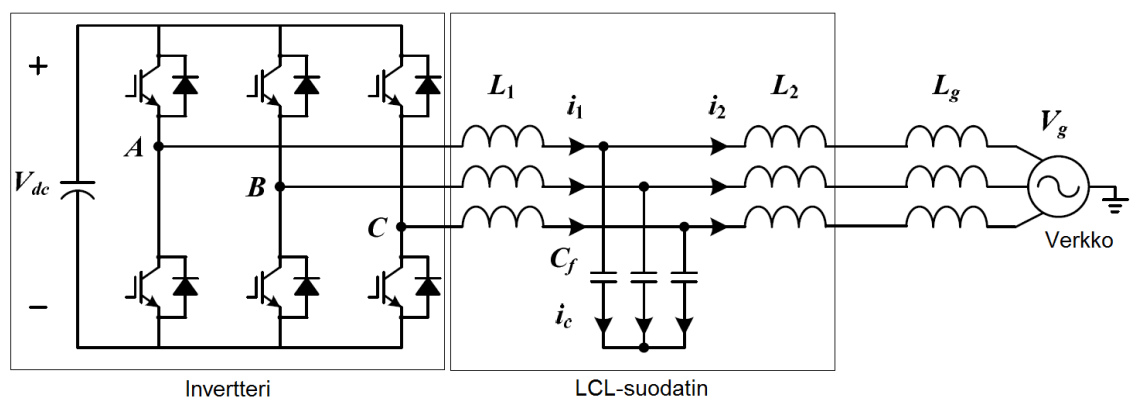


Kuva 7. Strikesorb-ylijännitesuojien sijoitus vaiheista maahan kolmivaiheisessa järjestelmässä [8, s. 20].

LCL-suodatin

LCL-suodattimia käytetään usein jännitevälipiirillisten invertterien ulostulovirran suodattamiseen. LCL-suodattimet minimoivat invertterien sähköverkkoon tuottaman virran sä-
rön. [9, s. 1.]

Kuvassa 8 on kuvattu LCL-suodattimen sijoitus invertterin ja verkon väliin. LCL:n kon-
densaattorit on tässä tapauksessa kytketty tähteen. Kolmiokytkentä on myös mahdolli-
nen.



Kuva 8. LCL-suodattimen sijoitus invertterin ja sähköverkon väliin [10, s. 2].

EMI-suodatinkortit

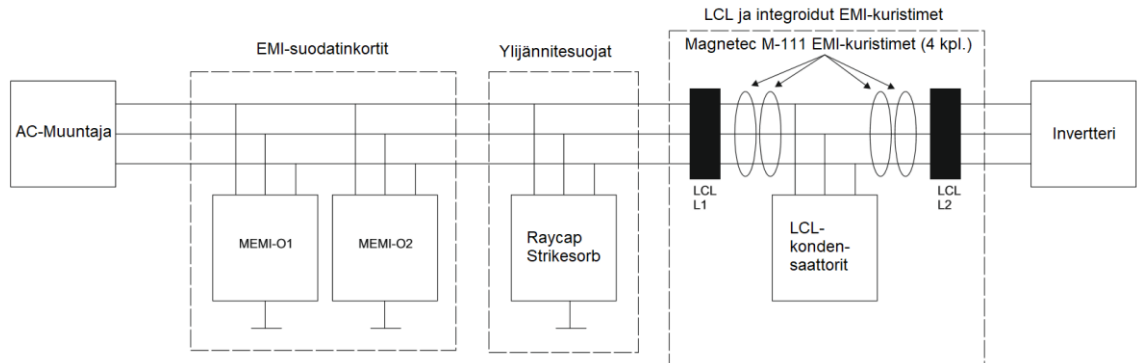
EUT:ssä käytetään kahta EMI-suodatinkorttia. EMI-suodatinkorttien toiminta perustuu varistoreihin ja kondensaattoreihin. EMI-suodatinkortit toimivat kuten ylijännitesuojat. EMI-suodatinkorteilla pyritään kuitenkin vaimentamaan suurempitaajuisia ja vähem-
pienergisiä häiriöitä kuin ylijännitesuojilla.

EMI-kuristimet

EUT:ssä käytetään EMI-kuristimena Magnetecin valmistamia kuristimia. Valmistaja tar-
joaa Spice-simulaatiomallin valmiiksi. EMI-kuristimet toimivat induktanssina, vaimentaen
erityisesti suuritaajuisia häiriösignaalia.

5 Simulaatio

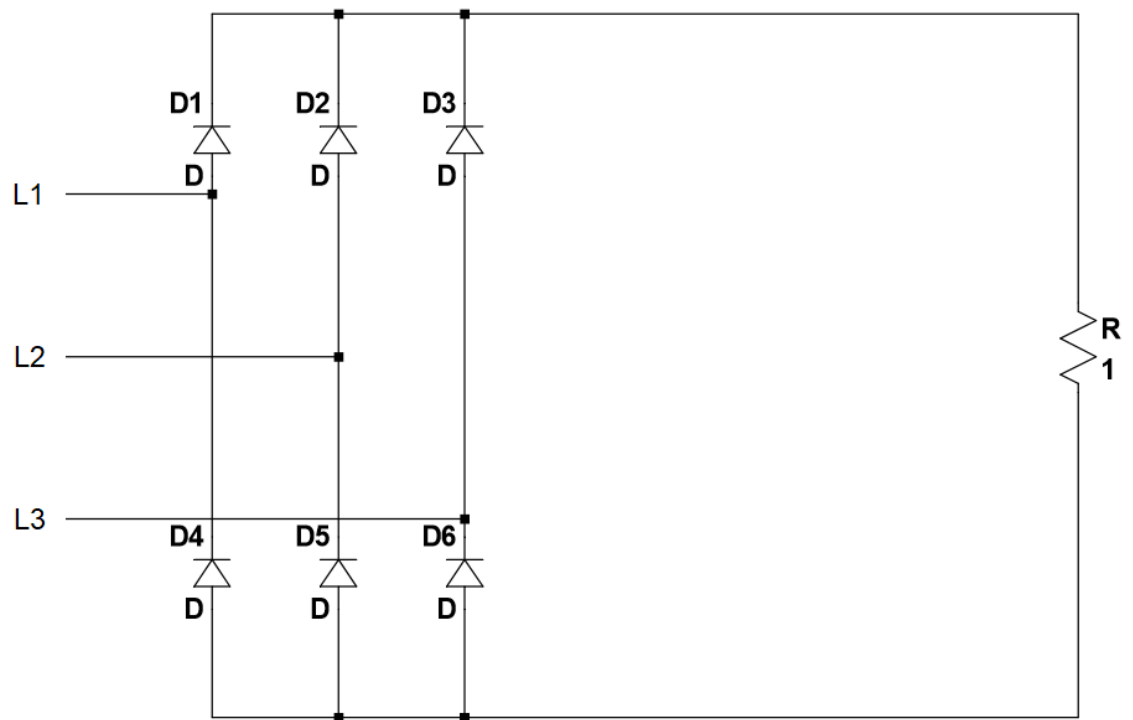
EUT:n suojalaitteiden sijoitus on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. EUT:n AC-puolen suojalaitteiden sijoitus.

Invertteri on kuvan 10 mukaisesti simuloitu kuusipulssitasasuuntaajana, joka syöttää tehoa vastuksen yli. Teho kulkee tällöin aina verkosta invertteriä kohti. Todellinen aurinkosähköinvertteri pystyy siirtämään tehoa molempiin suuntiin. Suojalaitteiden toiminnan kannalta tehon suunnalla ei oleteta olevan väliä.

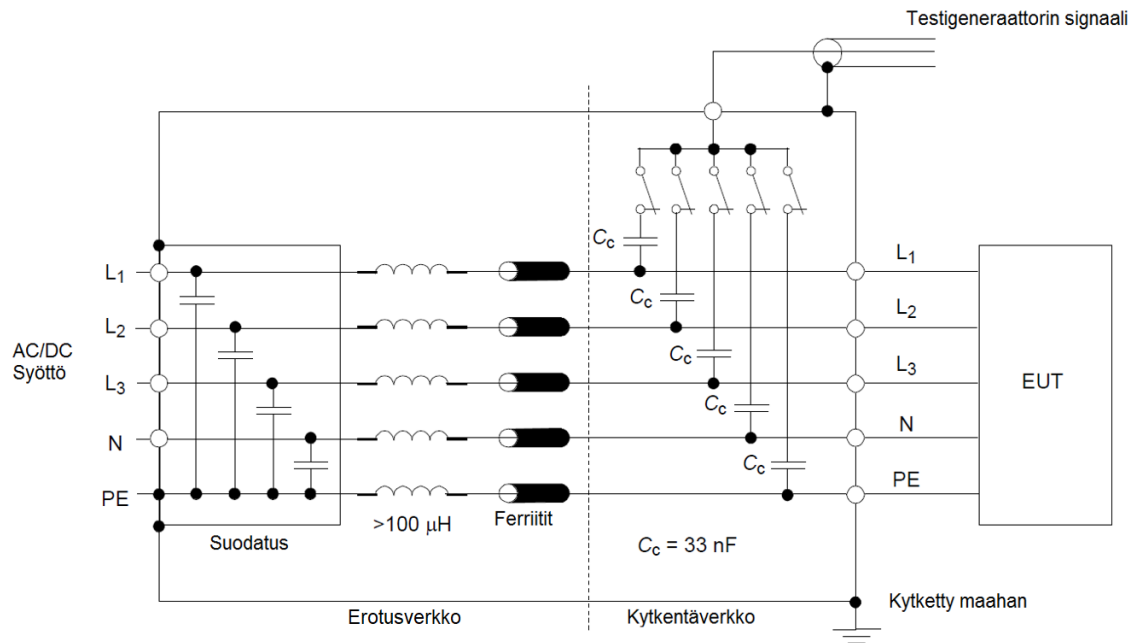
Vastuksena käytetty 1 ohmin vastus on valittu muuntajan tehon mukaan.



Kuva 10. Vastusta syöttävä kuusipulssitasasuuntaaja.

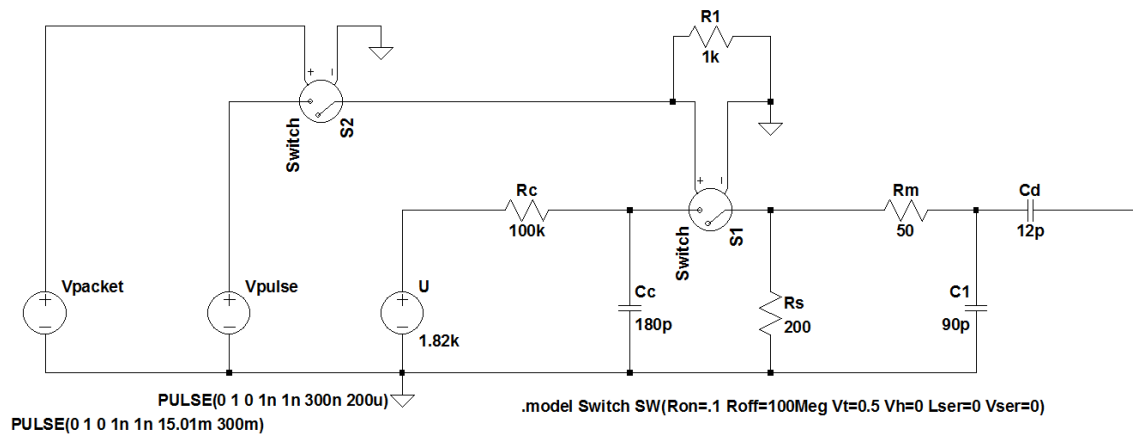
5.1 Nopean transienttipurskeen testin simulointi

Simuloitavan testijärjestelyn yleinen rakenne näkyy kuvassa 11.



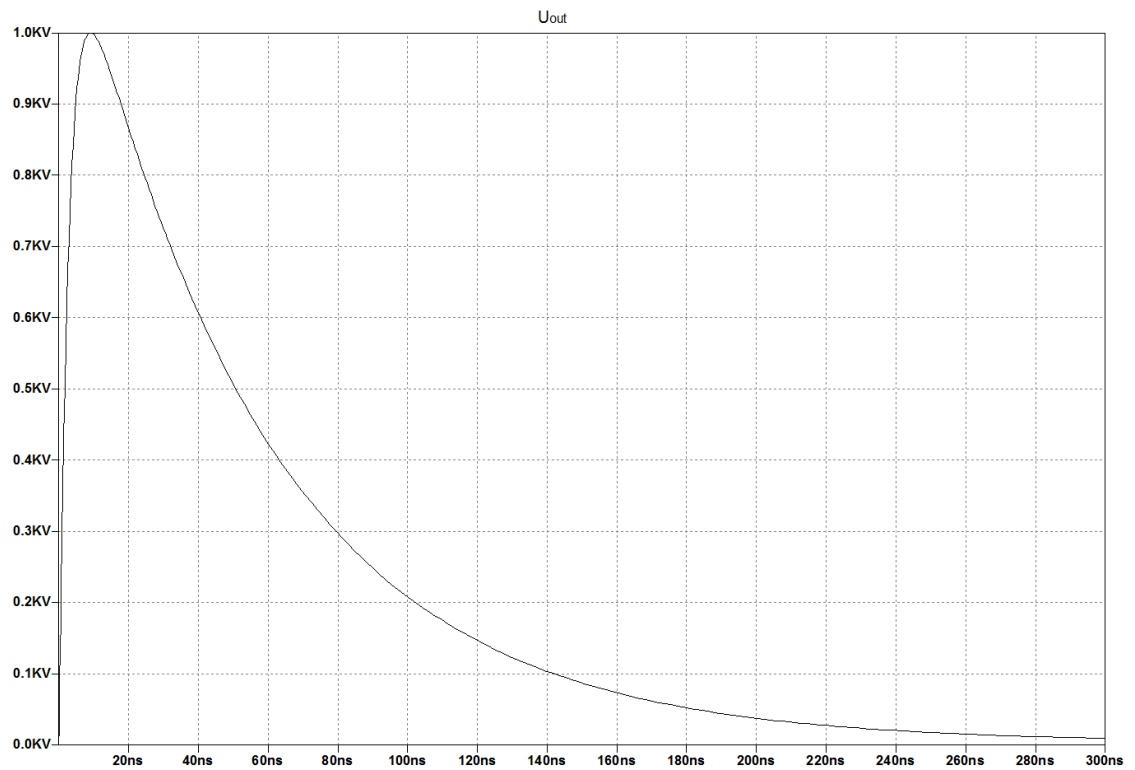
Kuva 11. Nopean transientipurskeen testin testijärjestely [6, s. 16].

Nopean transientipurskeen generaattorin komponentit simulaatiomallissa on määritetty kuvassa 12. Tämä generaattori tuottaa 1 kV:n piikkejä 200 μ s:n välein, 15 ms:n ajan. Nämä 15 ms:n purskeet toistuvat 300 ms:n välein.



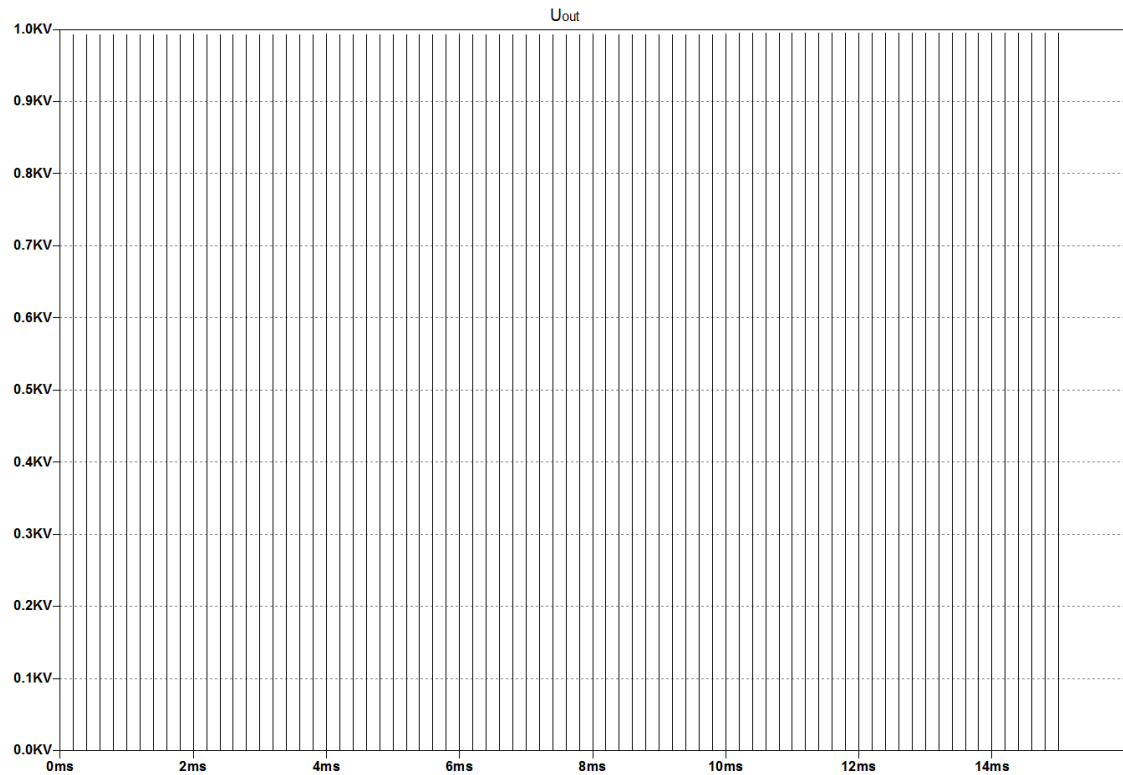
Kuva 12. Simuloitu nopean transientipurskeen generaattori.

Generaattorin tuottaman yhden pulssin jännitteen muoto on esitetty kuvassa 13. Pulssin nousuaika eli aika 0,1 kilovoltista 0,9 kilovolttiin on riittävällä tarkkuudella standardin vaatima 5 ns. Pulssin leveys eli aika jolloin jännite on yli 0,5 kilovoltia, on riittävällä tarkkuudella standardin vaatima 50 ns.



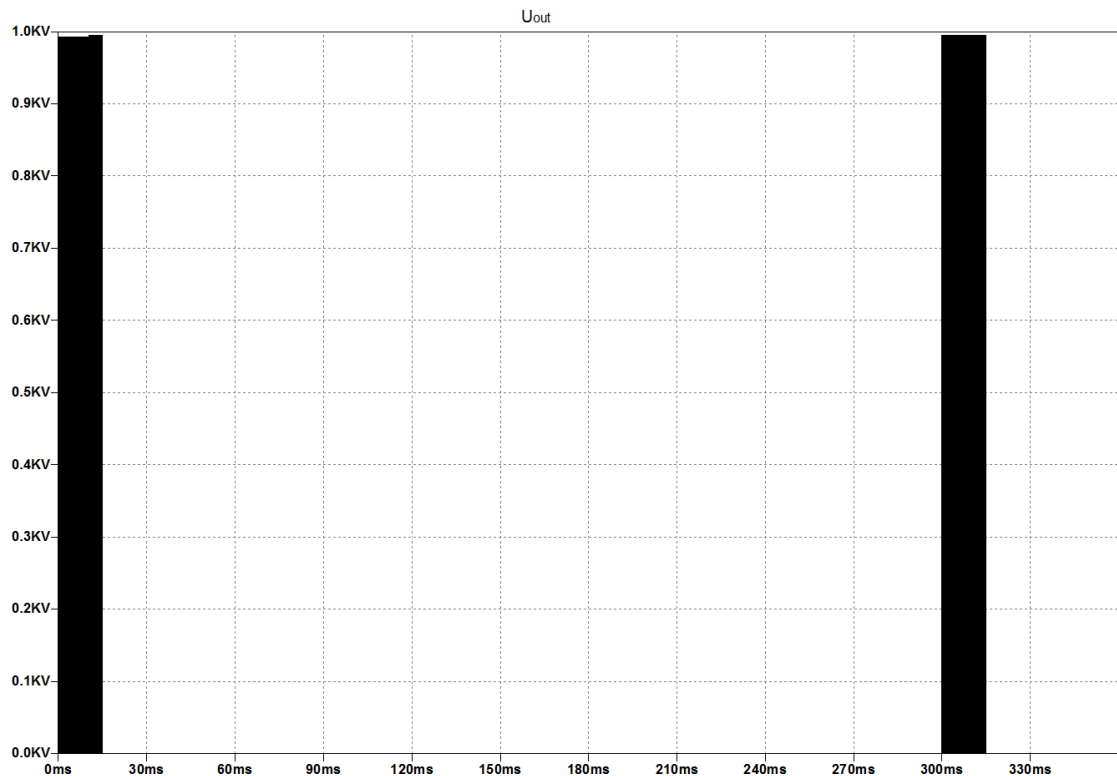
Kuva 13. Simuloitu nopean transientipurskeen generaattorin tuottaman jännitteen pulssimuoto.

Yhden purskeen pulssit on esitetty kuvassa 14. Toistumistaajuus on 5 kHz ja pulssit toistuvat 200 μ s:n välein. Näitä pulsseja tulee 15 ms:n purskeen aikana 75 kappaletta.



Kuva 14. Simuloitu nopean transienttipurskeen generaattorin tuottamien pulssien muodostama purske.

Kuvassa 15 on esitetty erillisten purskeiden toistumisaika. Yksittäinen purske kestää 15 ms ja purskeet toistuvat 300 ms:n välein.



Kuva 15. Simuloitu nopean transienttipurskeen generaattorin tuottamien purskeiden toistumisaika.

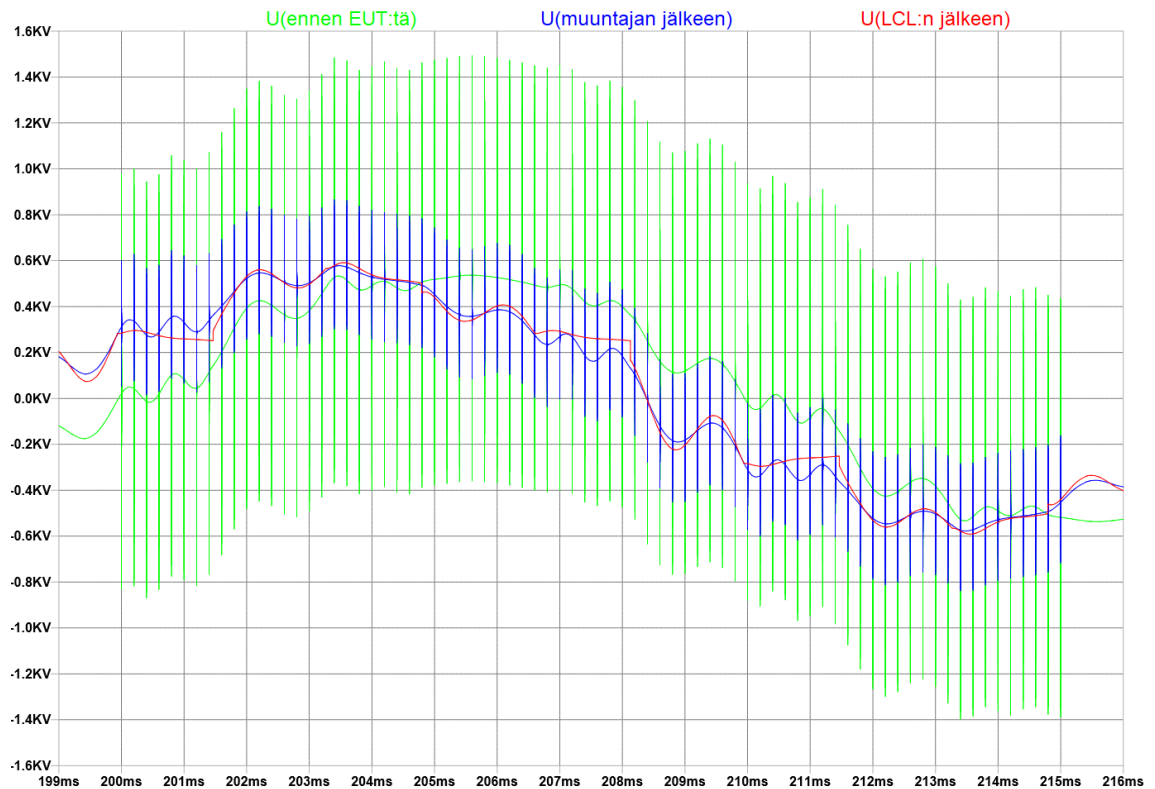
Nopean transienttipurskeen simulointi EUT:hen

Nopean transienttipurskeen generaattorin tuottamaa signaalia johdettiin simulaatiossa EUT:hen. Transienttipurskeen generaattorin tuottamana testitasona oli 1 kV. Simulaatiossa käytettiin suojalaitteina muuntajaa, EMI-suodatinkortteja, ylijännitesuojia sekä LCL-suodatinta. Muuntajan kytkentävirrän tasaantumista odotettiin viiden sekunnin ajan ennen tulosten ottamista.

Muuntajan ja LCL:n vaikutus

Simulaatio aloitettiin käyttämällä suojalaitteina ensin muuntajaa ja LCL:ää. Kuvassa 16 on esitetty transienttipurskeen vaikutus ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.

Muuntaja vaimentaa transienttien amplitudia säilyttäen kuitenkin pulssimuodon samanalaisena. LCL vaimentaa transientit kokonaan.

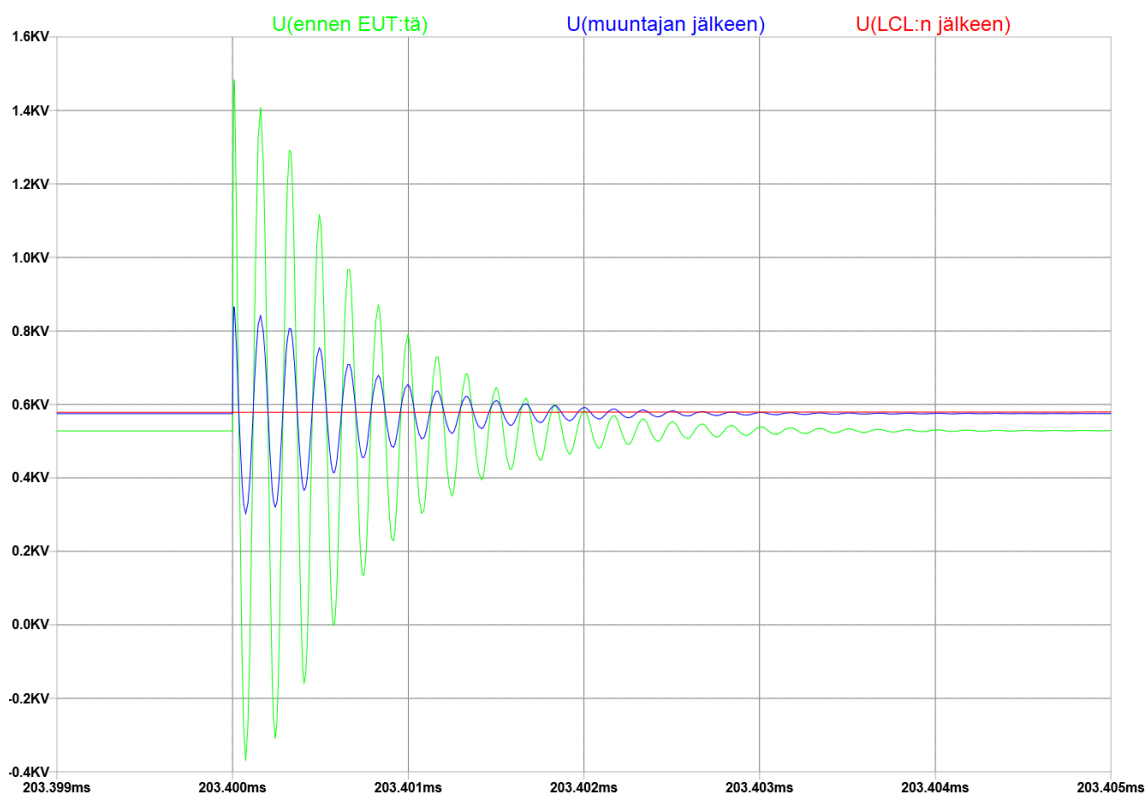


Kuva 16. EUT:n muuntajan ja LCL:n vaikutus transienttipurskeeseen.

Yhden pulssin kuvaaja ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen on esitetty kuvassa 17. Pulssi on kohdasta 203,4 ms.

Muuntaja vaimentaa 950 voltin amplitudisen pulssin 300 volttiin. LCL:n jälkeisessä jännitteessä ei näy minkäänlaista häiriötä.

Pulssi resonoi 6 MHz:n taajuudella vaimentuen noin 5 μ s:ssa.

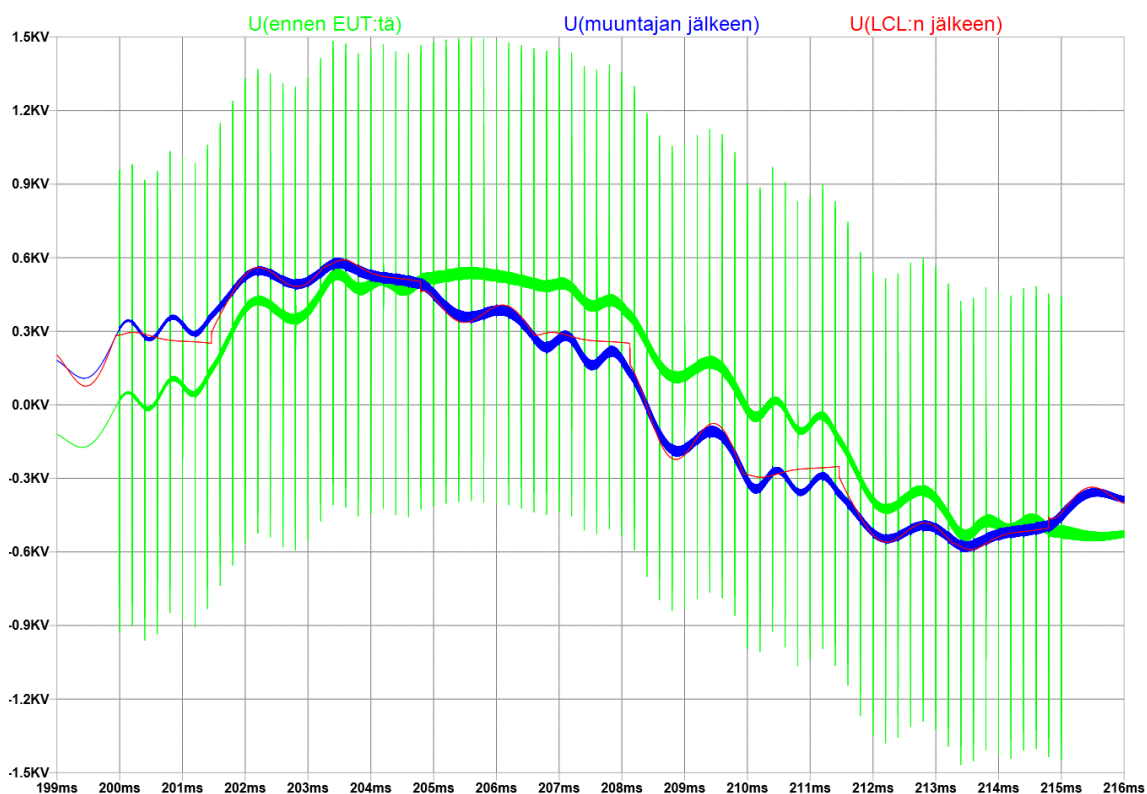


Kuva 17. EUT:n muuntajan ja LCL:n vaikutus transienttipurskeen yksittäiseen pulssiin.

Ylijännitesuojien vaikutus

Simulaatio suoritettiin seuraavaksi lisäämällä ylijännitesuojat muuntajan ja LCL:n väliin. Ylijännitesuojat vaikuttavat suoraan muuntajan jälkeiseen jännitteeseen. Kuvassa 18 on esitetty transienttipurskeen vaikutus ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.

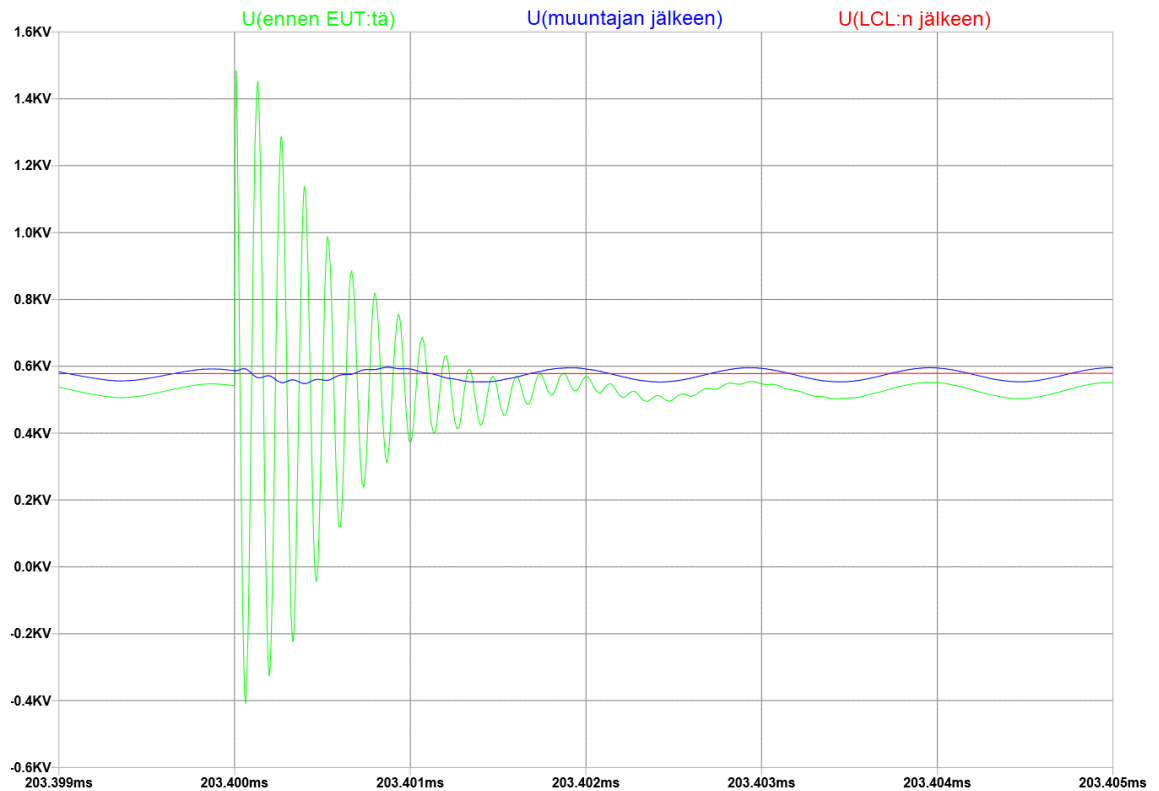
Ylijännitesuojat poistavat korkeat jännitepiikit muuntajan jälkeisestä jännitteestä. Ylijännitesuojat aiheuttavat kuitenkin resonanssia jännitteisiin ennen ja jälkeen muuntajan koko purskeen ajan. Resonanssi alkaa hitaasti vaimentua purskeen päätyttyä. LCL suodattaa resonanssin täysin.



Kuva 18. EUT:n muuntajan, ylijännitesuojien ja LCL:n vaikutus transienttipurskeeseen.

Kuvassa 19 on lisäksi esitetty yhden pulssin kuvaaja ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen. Pulssi on kohdasta 203,4 ms.

Muuntajan jälkeisessä jännitteessä on pientä noin 5 voltin amplitudin resonanssia 6 MHz:n taajuudella, mikä on nähtävissä vain korkeimmilla jännitepiikeillä. Sekä ennen muuntajaa että muuntajan jälkeen oleva jännite resonoi noin 0,8 MHz:n taajuudella ja 20 voltin amplitudilla. Tämä resonanssi ei vaimene merkittävästi yksittäisen pulssitapahtuman aikana.

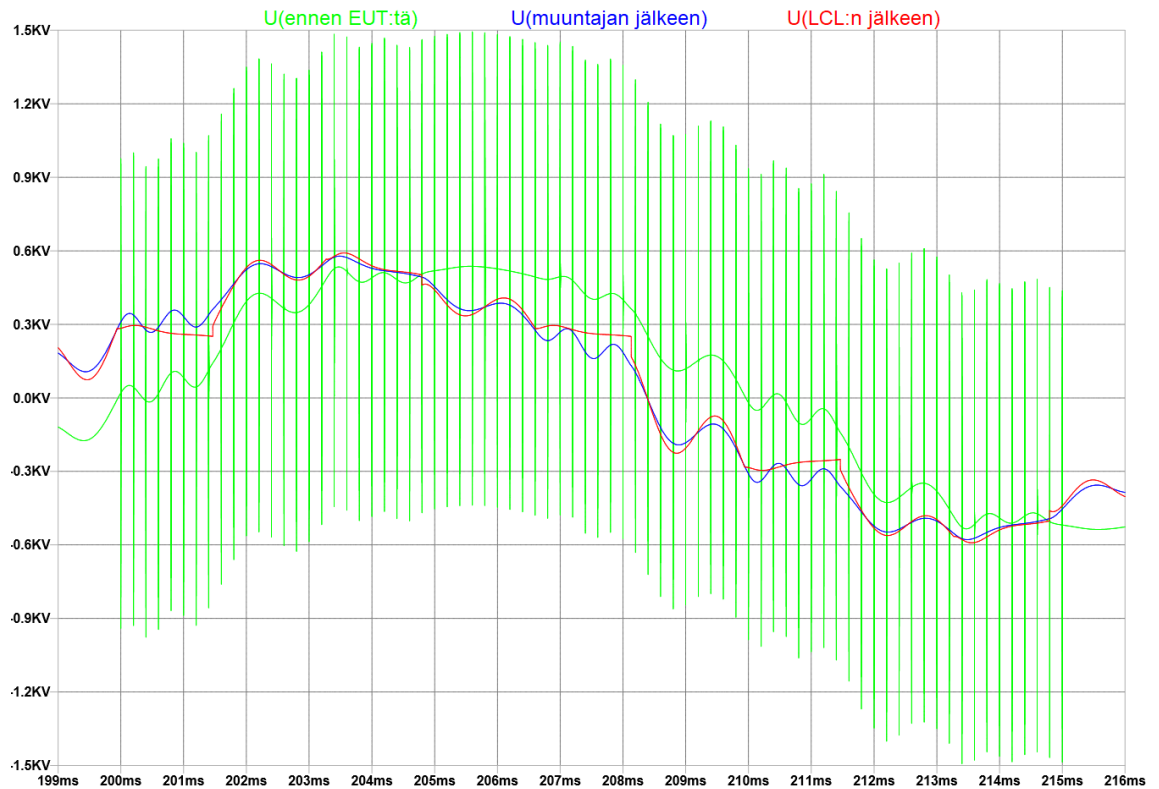


Kuva 19. EUT:n muuntajan, ylijännitesuojien ja LCL:n vaikutus transienttipurskeen yksittäiseen pulssiin.

EMI-suodatinkorttien vaikutus

EMI-suodatinkorttien vaikutus nopeaan transienttipurskeeseen simuloitiin ensin ilman ylijännitesuojia. EMI-suodatinkortit vaikuttavat kuten ylijännitesuojat muuntajan jälkeiseen potentiaaliin. Kuvassa 20 on kuvattu transienttipurskeen vaikutus ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.

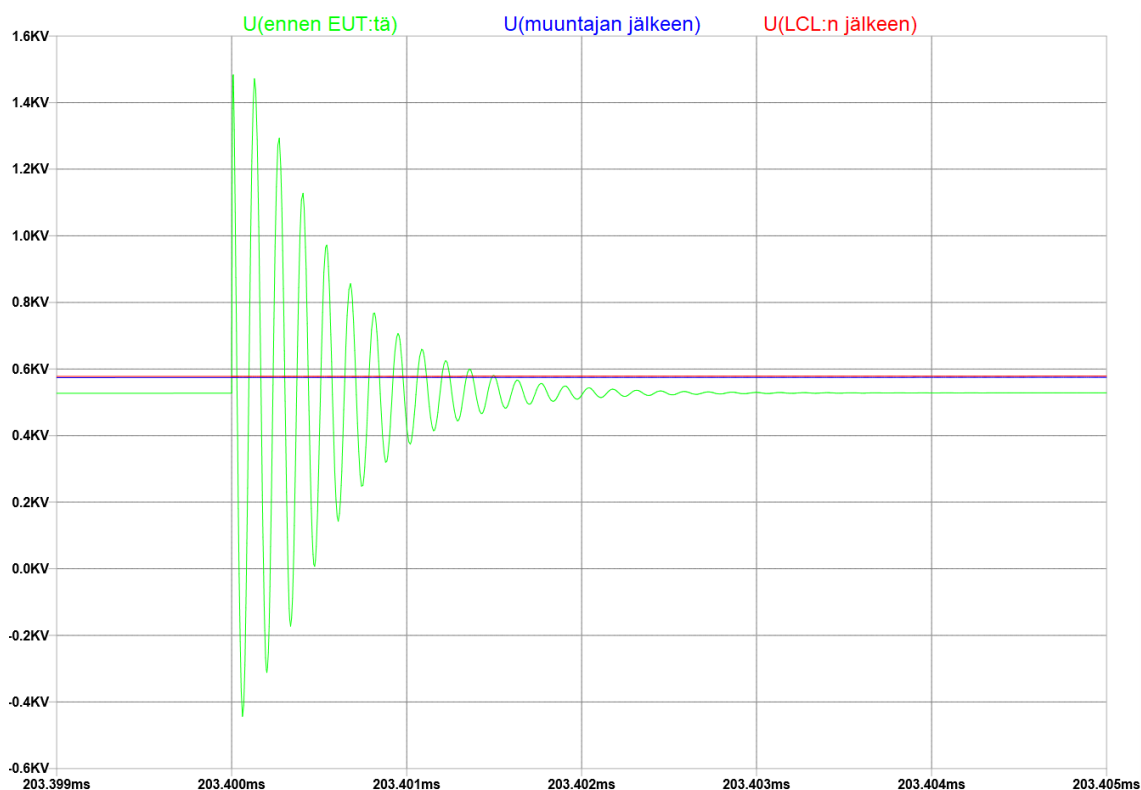
EMI-suodatinkortit vaimentavat transientit täysin muuntajan jälkeisestä jännitteestä.



Kuva 20. EUT:n muuntajan, EMI-suodatinkorttien ja LCL:n vaikutus transienttipurskeeseen.

Kuva 21 esittää yhden pulssin kuvaajan ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen. Pulssi on kohdasta 203,4 ms.

Muuntajan tai LCL:n jälkeisessä jännitteessä ei näy minkäänlaista transienttien aiheuttamaa häiriötä.



Kuva 21. EUT:n muuntajan, EMI-suodatinkorttien ja LCL:n vaikutun transienttipurskeen yksittäiseen pulssiin.

EMI-suodatinkorttien ja ylijännitesuojien yhteisvaikutus

EMI-suodatinkorttien ja ylijännitesuojien yhteistoimintaa selvitettiin simuloimalla molemmat kytkettyinä muuntajan jälkeiseen potentiaaliin. Tuloksena oli samanlainen pulssimuoto kuin edeltävässä simulaatiossa, jossa ylijännitesuojat olivat kytkemättä.

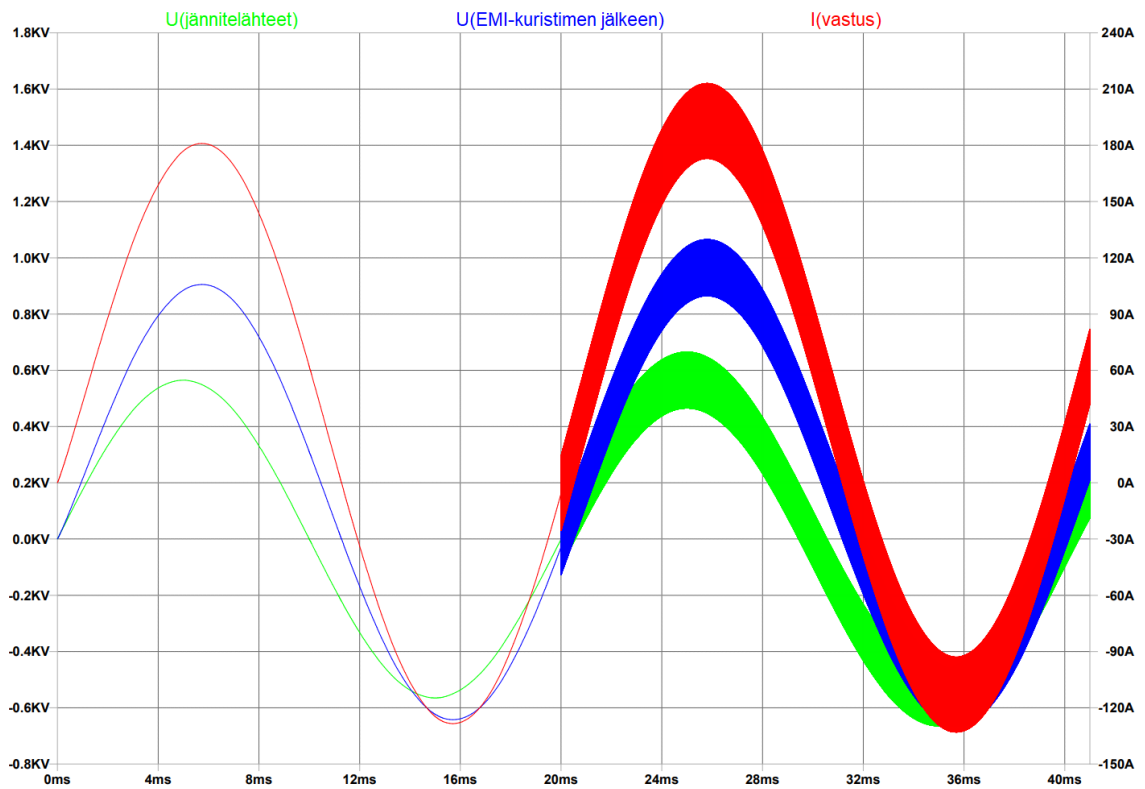
EMI-kuristimien simulointi

EMI-kuristimien lisäämistä simulaatiomalliin yritettiin. Tulokset eivät kuitenkaan olleet järkeviä vaan jännite ja virta alkoivat resonoida kohti ääretöntä. Valmistajan tarjoaman EMI-kuristinmallin toimintaa yritettiin tutkia vielä yksinkertaistetussa piirissä, joka oli yksivaiheinen ja josta puuttui muut suojalaitteet.

Piirissä oli kaksi sarjassa olevaa jännitelähdettä, 50 Hz:n ja 1 MHz:n signaalien tuottamiseen. Näiden jälkeen sarjassa oli EMI-kuristin sekä kuormana oleva vastus. 50 Hz:n signaalia syötettiin koko simulaation ajan ja 1 MHz:n signaalia toisen siniaallon ajan 20 ms ajanhetkestä lähtien.

Kuvasta 22 nähdään EMI-kuristimen jännitettä nostava vaikutus sekä vaiheensiirto positiivisen jännitteen puolella. Kuvasta nähdään myös virran muoto, joka seuraa EMI-kuristimen jälkeistä jännitettä.

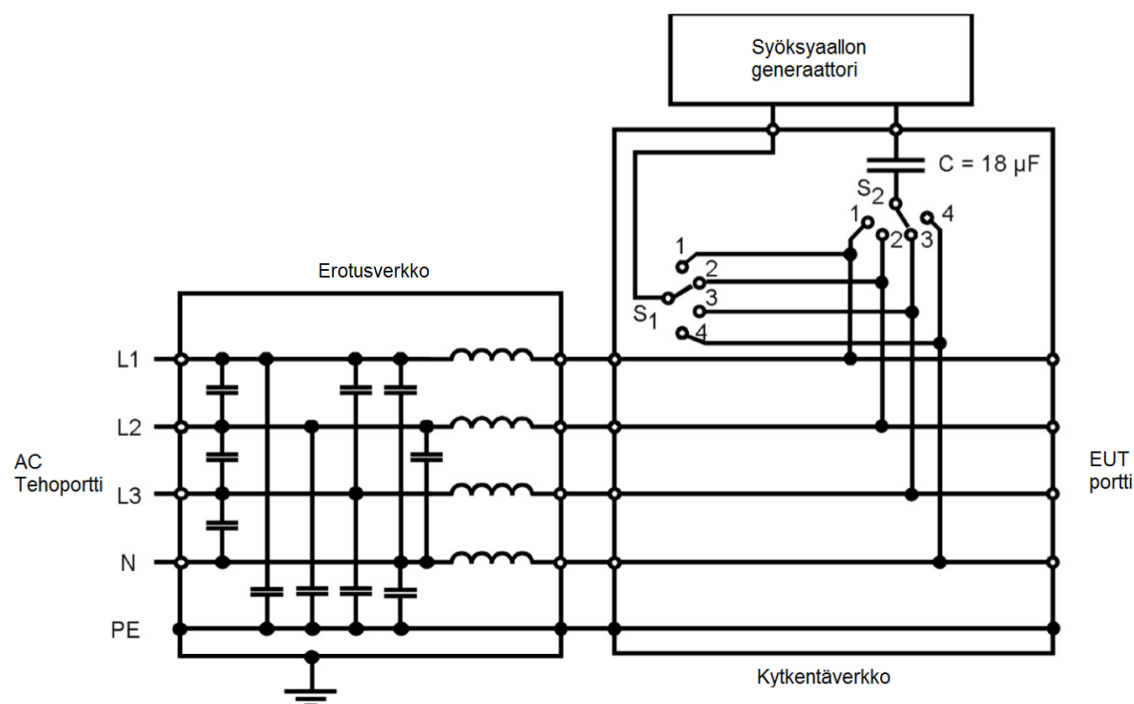
EMI-kuristinmallin toiminnassa on vikaa, sillä se muuttaa jännitteen muotoa huomattavasti eikä myöskään vaimenna transientteja merkittävästi.



Kuva 22. EMI-kuristimen vaikutus pieni- ja suuritaajuiseen signaaliin.

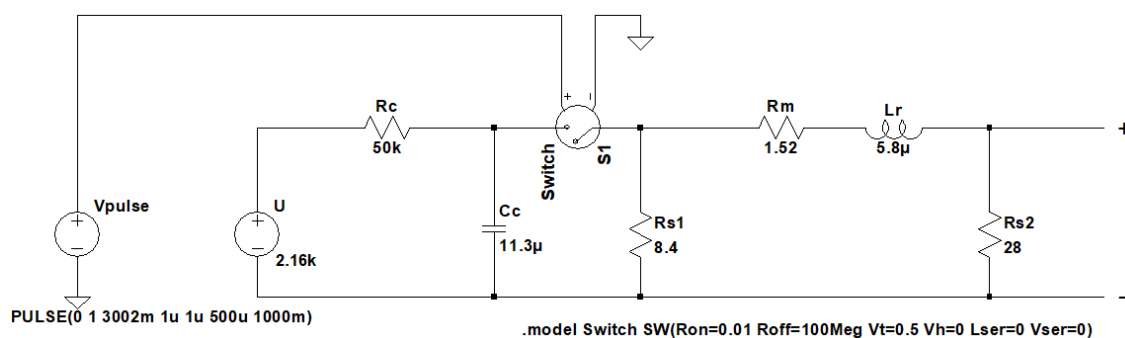
5.2 Syöksyaallon testin simulointi

Simuloitavan testijärjestelyn yleinen rakenne näkyy kuvassa 23.



Kuva 23. Syöksyaallon testin testijärjestely [7, s. 24.]

Syöksyaallon generaattorin komponentit simulaatiomallissa on määritetty kuvassa 24. Tämä generaattori tuottaa 2 kV:n syöksyaallon.

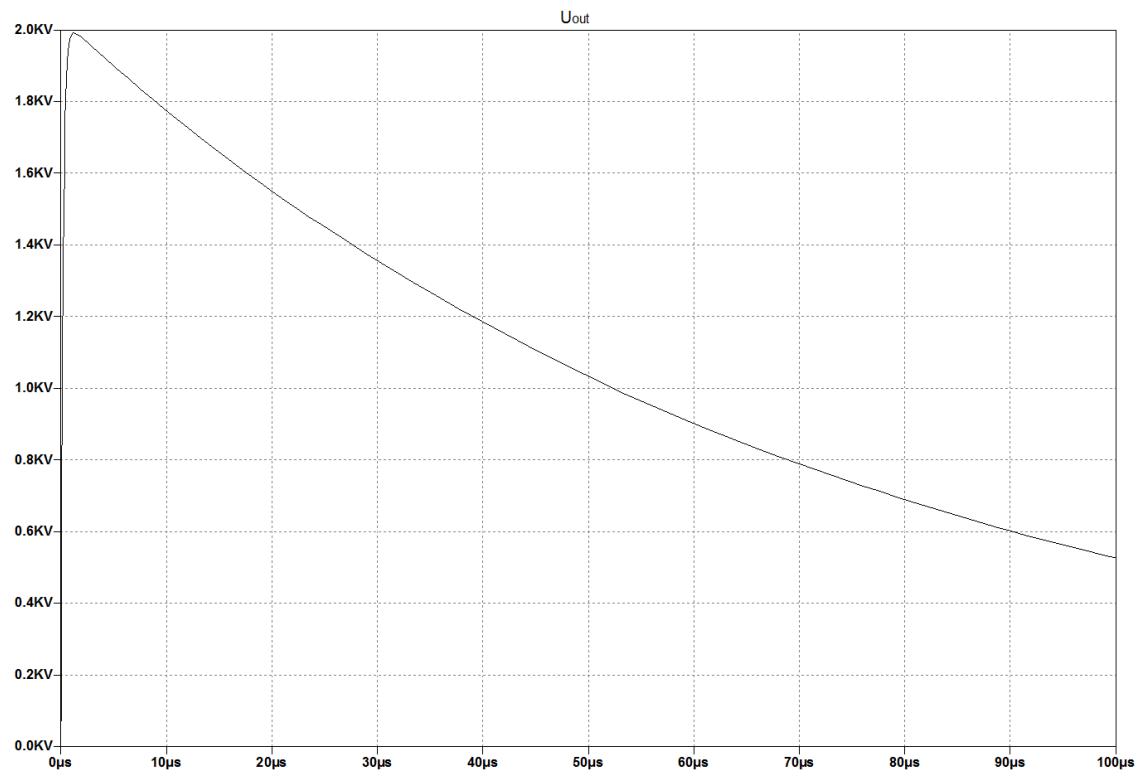


Kuva 24. Simuloitu syöksyaaltogeneraattori.

Komponenttiarvoja säätäessä tuli ottaa huomioon, että komponentit vaikuttavat eri lailla avoimen piirin jännitteeseen ja oikosuljetun piirin virtaan. Komponenttien valinnassa otettiin huomioon pääseminen molemmissa pulssimuodoissa standardin vaatimiin rajoihin.

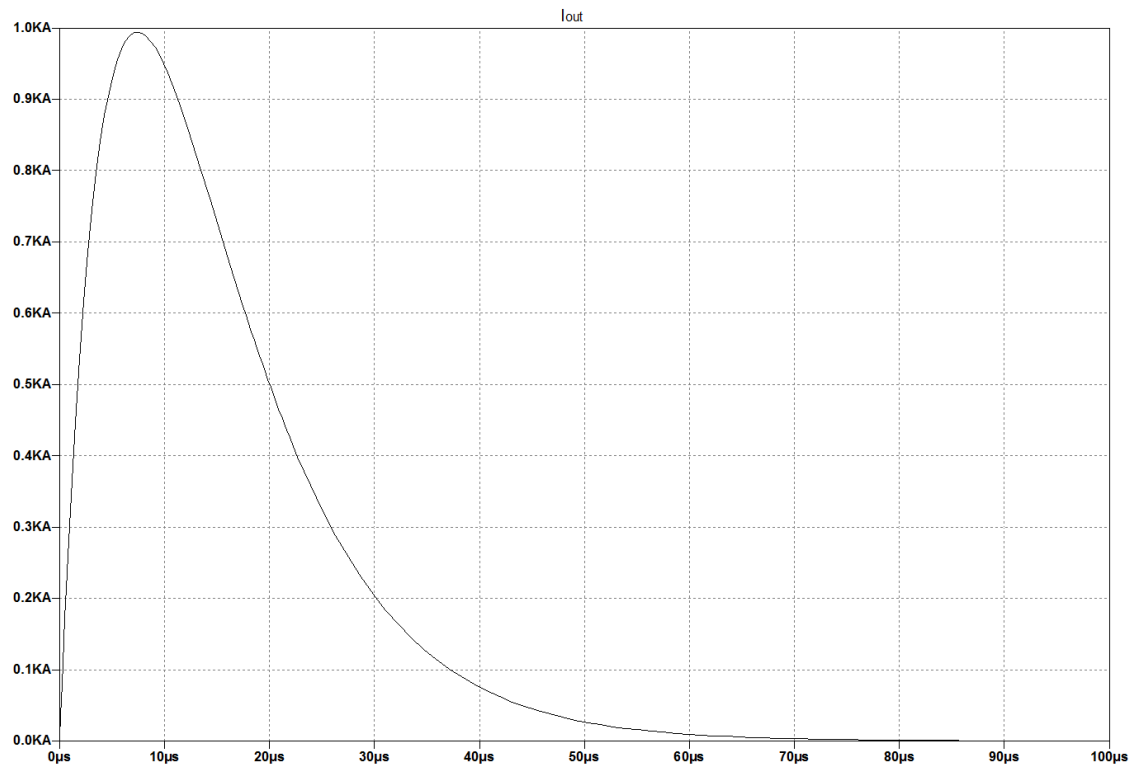
Avoimen piirin jännitteen pulssimuoto on esitetty kuvassa 25. Etuaika eli jännitteen nousu nolasta 2 kilovolttiin on riittävällä tarkkuudella standardin vaatima 1,2 μs. Pulssin

kesto eli aika nolasta jännitteen laskemiseen 1 kilovolttiin on riittävällä tarkkuudella standardin vaatima $50\ \mu\text{s}$.



Kuva 25. Simuloitu syöksyaaltogeneraattorin tuottaman jännitteen pulssimuoto avoimessa piirissä.

Oikosuljetun piirin virran pulssimuoto on esitetty kuvassa 26. Etuaika eli virran nousu nolasta 1 kiloampeeriin on riittävällä tarkkuudella standardin vaatima $8\ \mu\text{s}$. Pulssin kesto eli aika nolasta virran laskemiseen $0,5$ kiloampeeriin on riittävällä tarkkuudella standardin vaatima $20\ \mu\text{s}$.



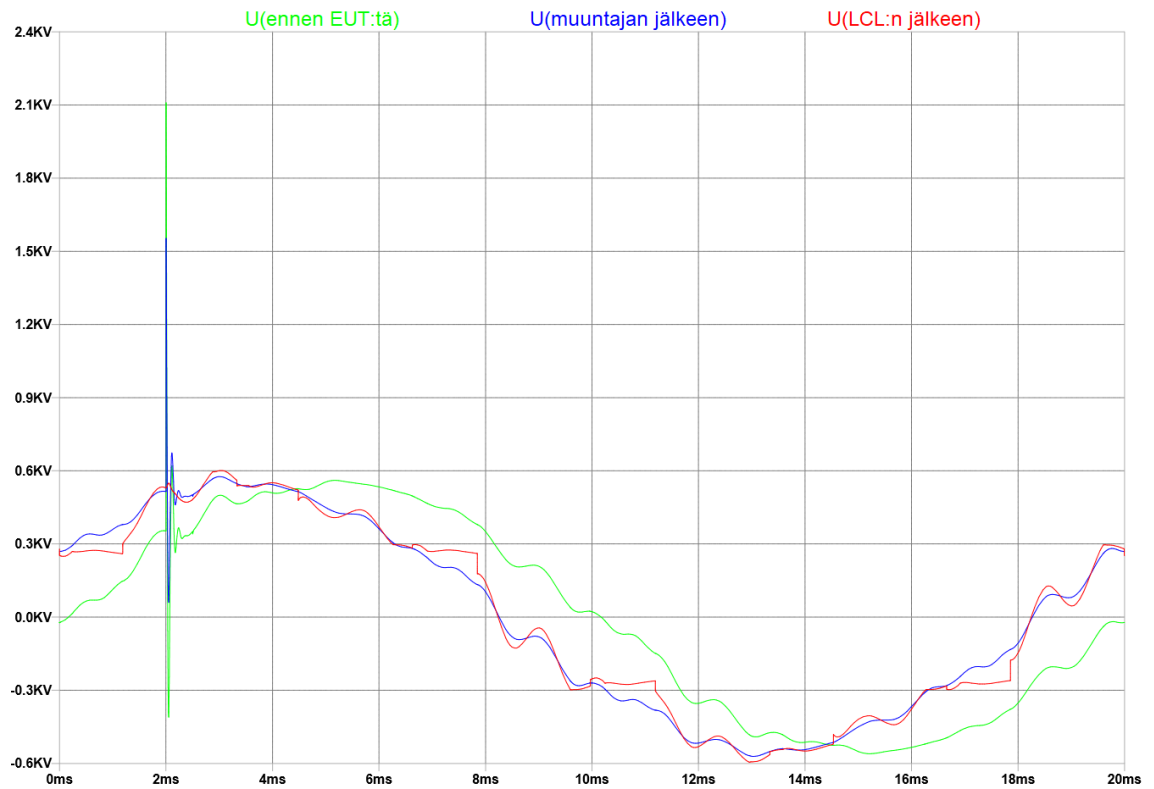
Kuva 26. Simuloitu syöksyaaltogeneraattorin tuottaman virran pulssimuoto oikosuljetussa piirissä.

Syöksyaallon simulointi EUT:hen

Syöksyaaltogeneraattorin tuottamaa signaalia johdettiin simulaatiossa EUT:hen. Syöksyaaltogeneraattorin tuottamana testitasona oli 4 kV vaiheesta vaiheeseen. Näin suurta jännitettä käytettiin suojalaitteiden vaikutusten esiintuomiseksi. Simulaatiossa käytettiin suojalaitteina muuntajaa, EMI-suodatinkortteja, ylijännitesuojia sekä LCL-suodatinta. Muuntajan kytkentävirran tasaantumista odotettiin noin kolmen sekunnin ajan.

Muuntajan ja LCL:n vaikutus

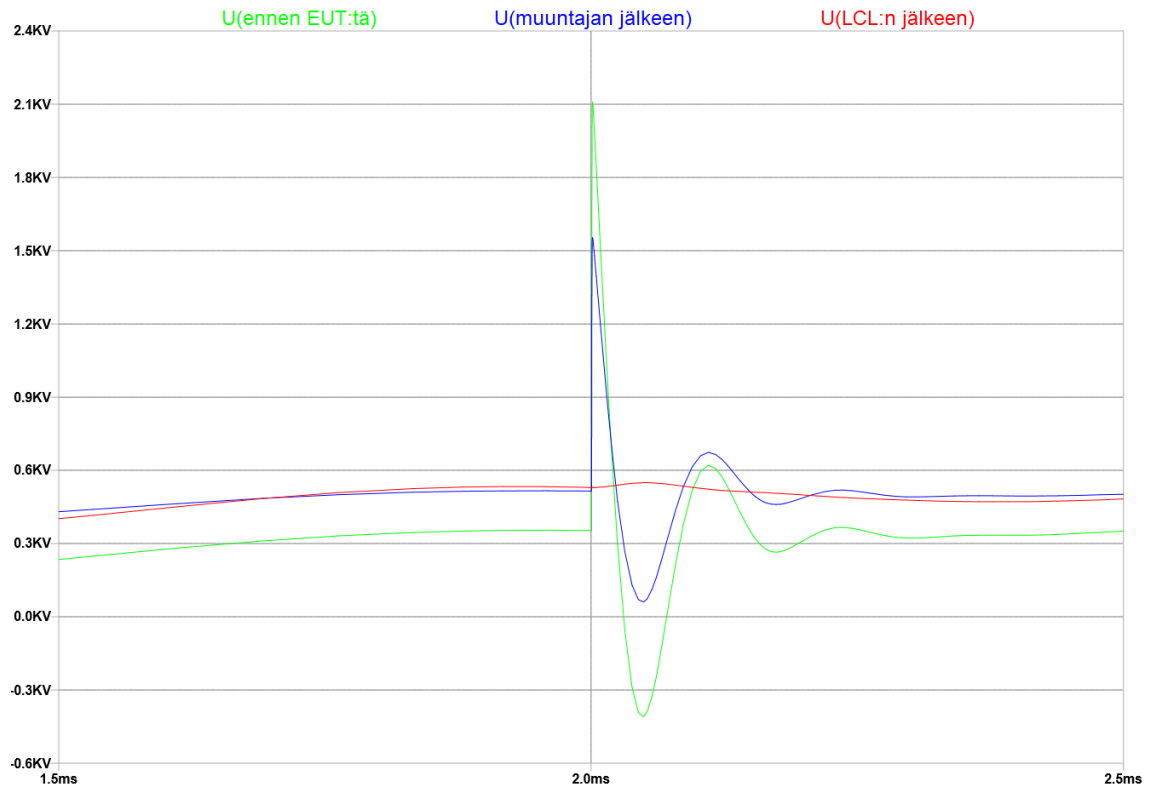
Simulointi suoritettiin aluksi käyttämällä suojalaitteina muuntajaa ja LCL:ää. Kuvassa 27 on esitetty syöksyaallon vaikutus ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.



Kuva 27. EUT:n muuntajan ja LCL:n vaikutus syöksyaaltoon.

Kuvassa 28 on esitetty hetkellinen tapahtuma syöksyaallon vaikutuksesta ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.

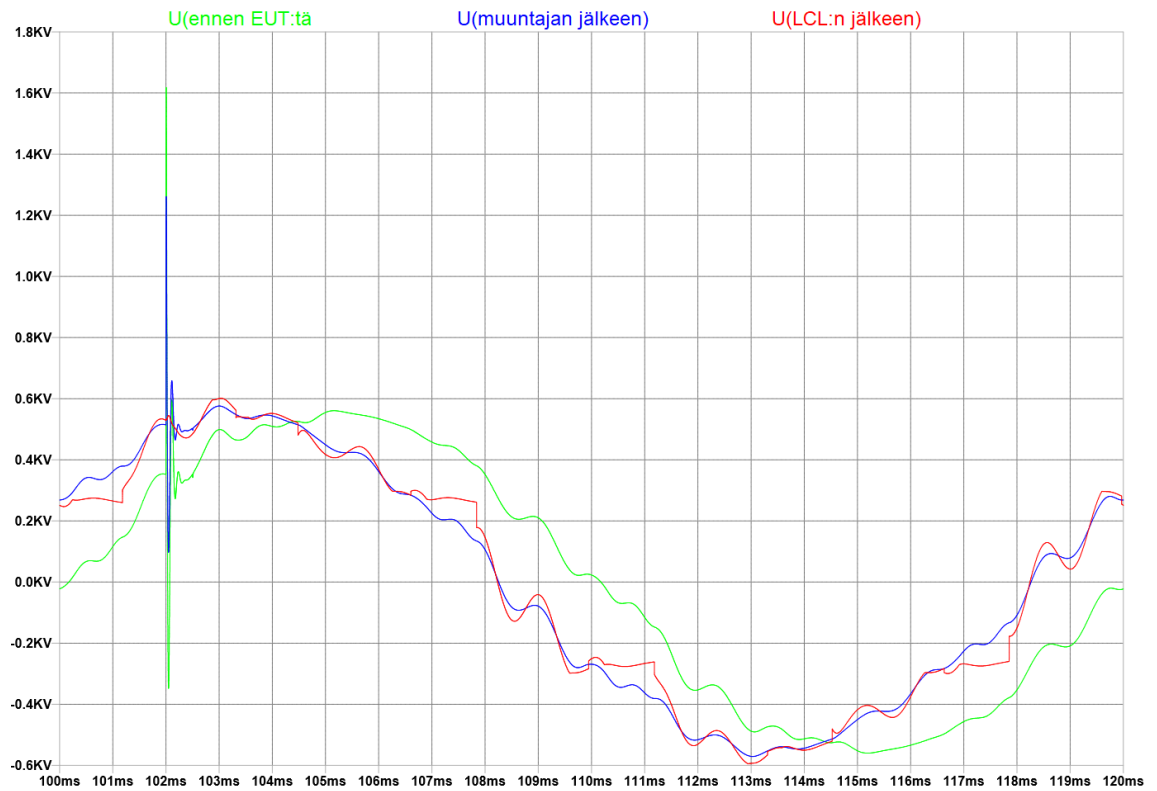
Muuntaja vaimentaa syöksyaallon amplitudin 1750 voltista 1050 volttiin. LCL vaimentaa syöksyaallon vaikutuksen kokonaan.



Kuva 28. Hetkellinen tapahtuma EUT:n muuntajan ja LCL:n vaikutuksesta syöksyaaltoon.

Ylijännitesuojien vaikutus

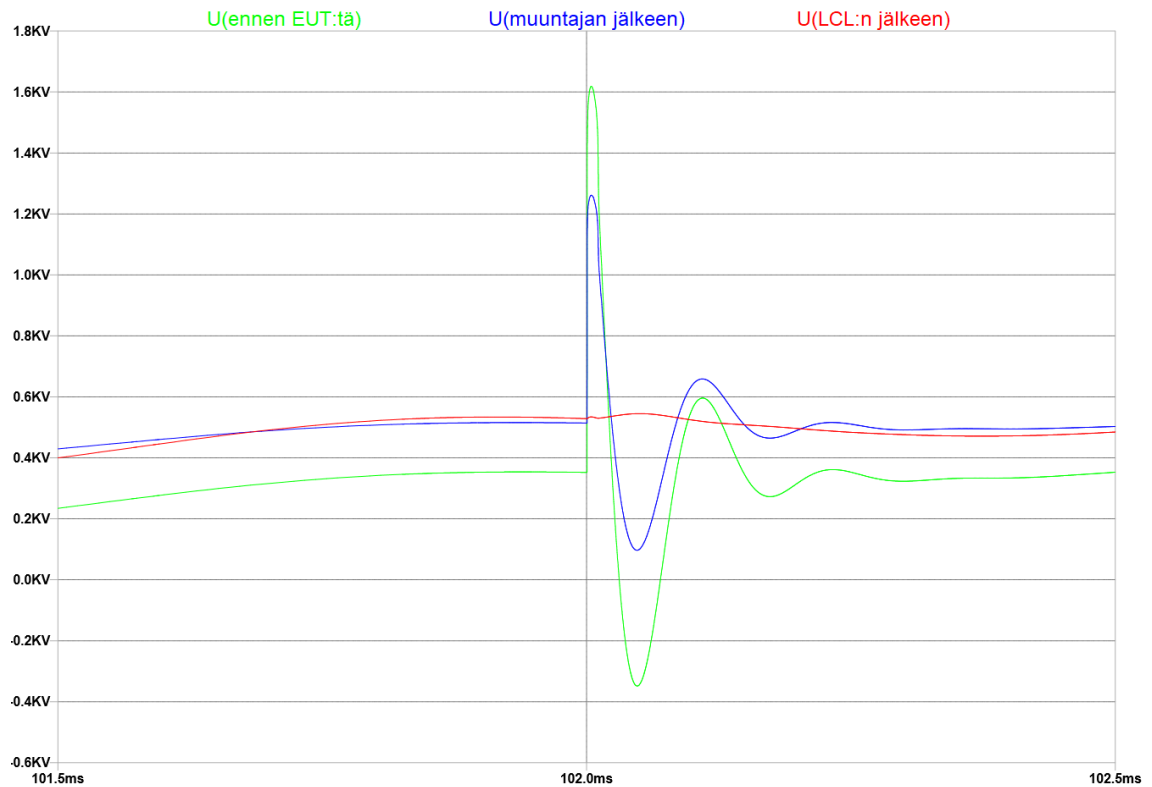
Simulaatio suoritettiin seuraavaksi lisäämällä ylijännitesuojat muuntajan ja LCL:n väliin. Ylijännitesuojat vaikuttavat suoraan muuntajan jälkeiseen jännitteeseen. Kuvassa 29 on esitetty syöksyaallon vaikutus ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.



Kuva 29. EUT:n muuntajan, ylijännitesuojien sekä LCL:n vaikutus syöksyaaltoon.

Kuvassa 30 on esitetty hetkellinen tapahtuma syöksyaallon vaikutuksesta ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.

Ylijännitesuojat vaimentavat syöksyaallon amplitudia ennen ja jälkeen muuntajan. Muuntaja vaimentaa syöksyaallon amplitudin 1250 voltista 750 volttiin.

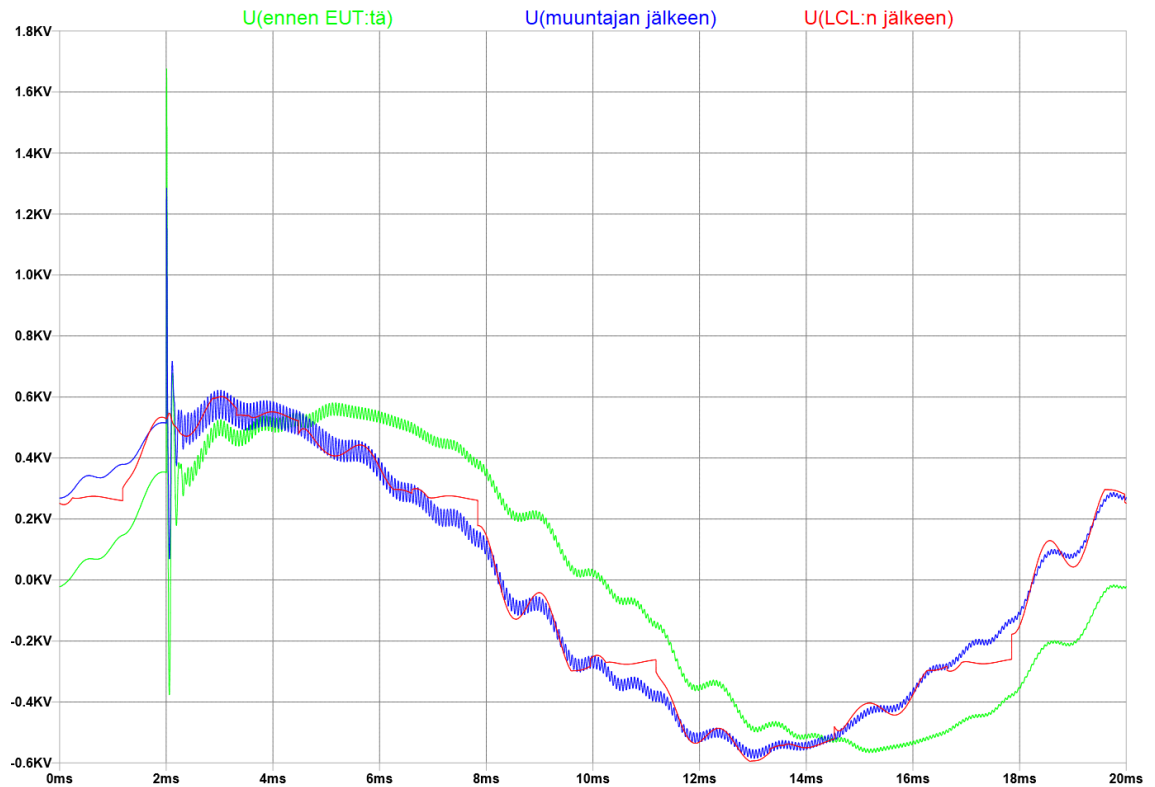


Kuva 30. Hetkellinen tapahtuma EUT:n muuntajan, ylijännitesuojien sekä LCL:n vaikutuksesta syöksyaaltoon.

EMI-suodatinkorttien vaikutus

EMI-suodatinkorttien vaikutus syöksyaaltoon simuloitiin ensin ilman ylijännitesuojia. EMI-suodatinkortit vaikuttavat kuten ylijännitesuojat muuntajan jälkeiseen potentiaaliin. Kuvassa 31 on kuvattu syöksyaallon vaikutus ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.

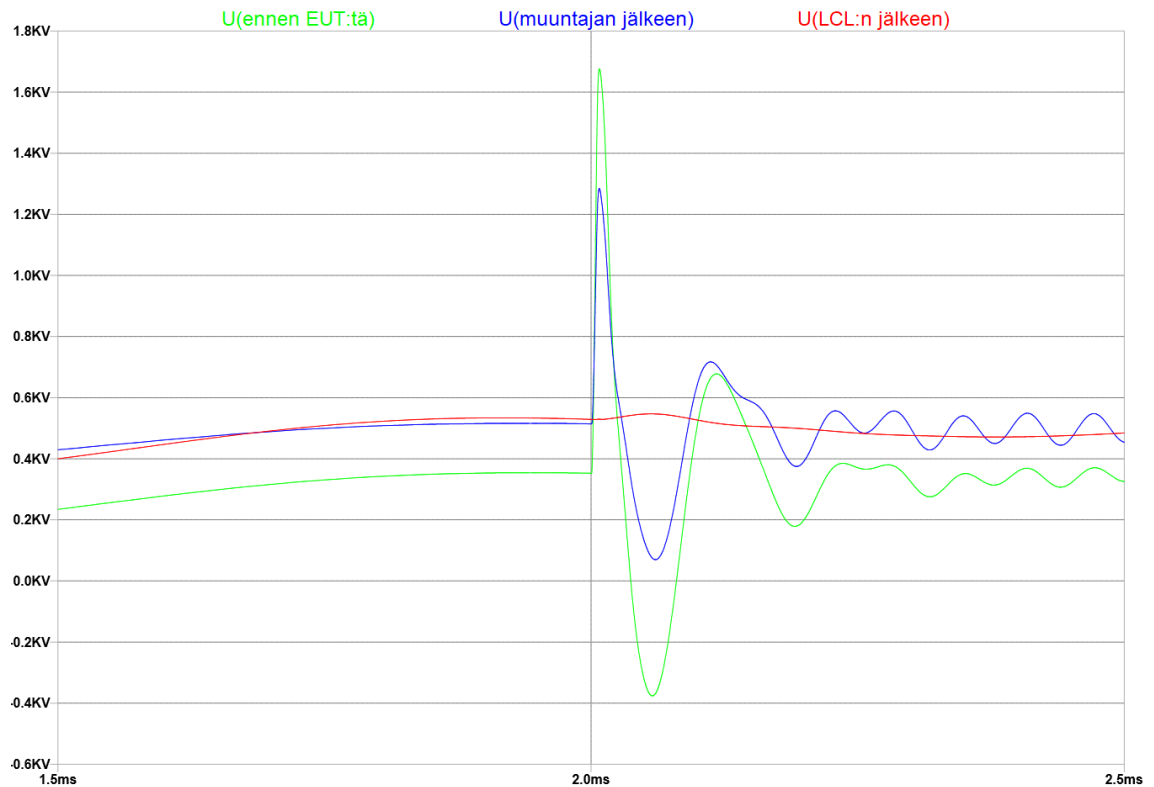
Ennen ja jälkeen muuntajan olevissa jännitteissä näkyy hitaasti vaimenevaa resonanssia syöksyaallosta alkaen. LCL vaimentaa syöksyaallon täysin.



Kuva 31. EUT:n muuntajan, EMI-suodatinkorttien sekä LCL:n vaikutus syöksyaaltoon.

Kuvassa 32 on esitetty hetkellinen tapahtuma syöksyaallon vaikutuksesta ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen, lisätyillä EMI-suodatinkorteilla.

EMI-suodatinkortit vaimentavat jännitepulssein amplitudia ennen ja jälkeen muuntajan. Muuntaja vaimentaa jännitteen amplitudia 1320 voltista 770 volttiin. EMI-suodatinkortit aiheuttavat resonanssia syöksyaallon jälkeen 16,7 kHz:n taajuudella ja 50 voltin amplitudilla.

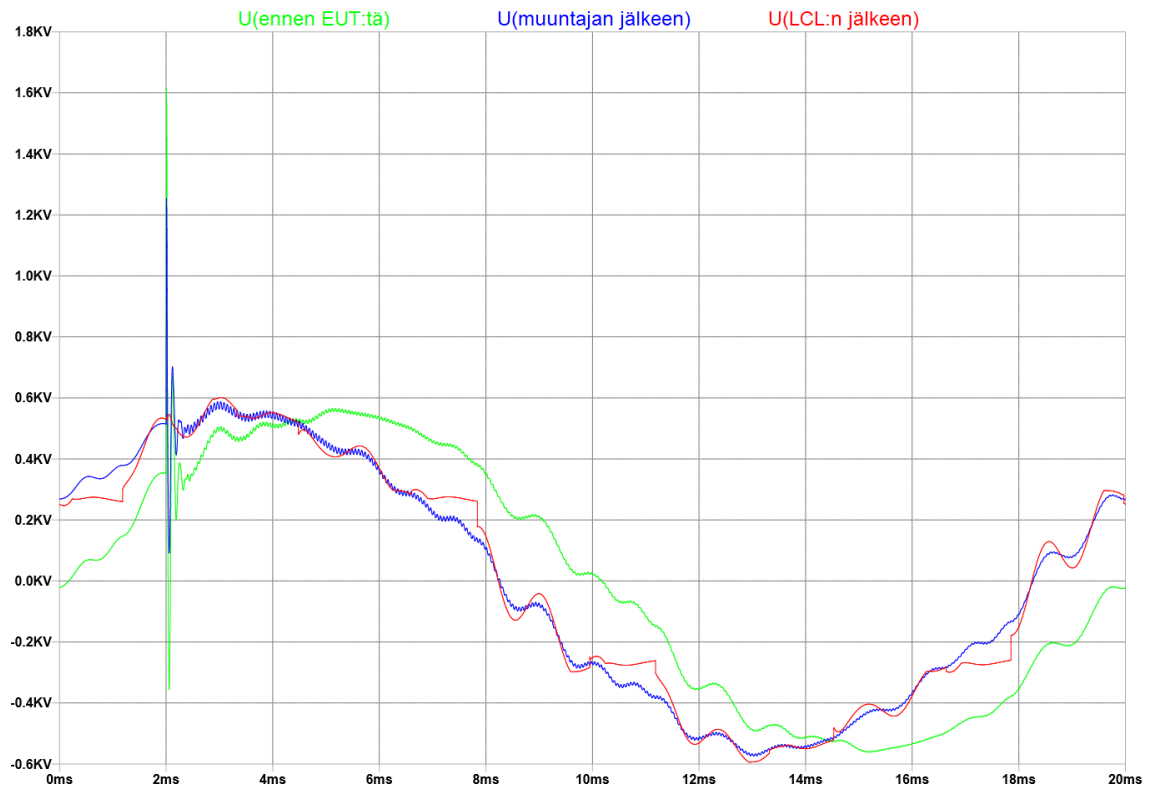


Kuva 32. Hetkellinen tapahtuma EUT:n muuntajan, EMI-suodatinkorttien sekä LCL:n vaikutuksesta syöksyaaltoon.

EMI-suodatinkorttien ja ylijännitesuojien yhteisvaikutus

Simulointi tehtiin kytkemällä sekä EMI-suodatinkortit että ylijännitesuojat. Kuvassa 33 on esitetty syöksyaallon vaikutus ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen.

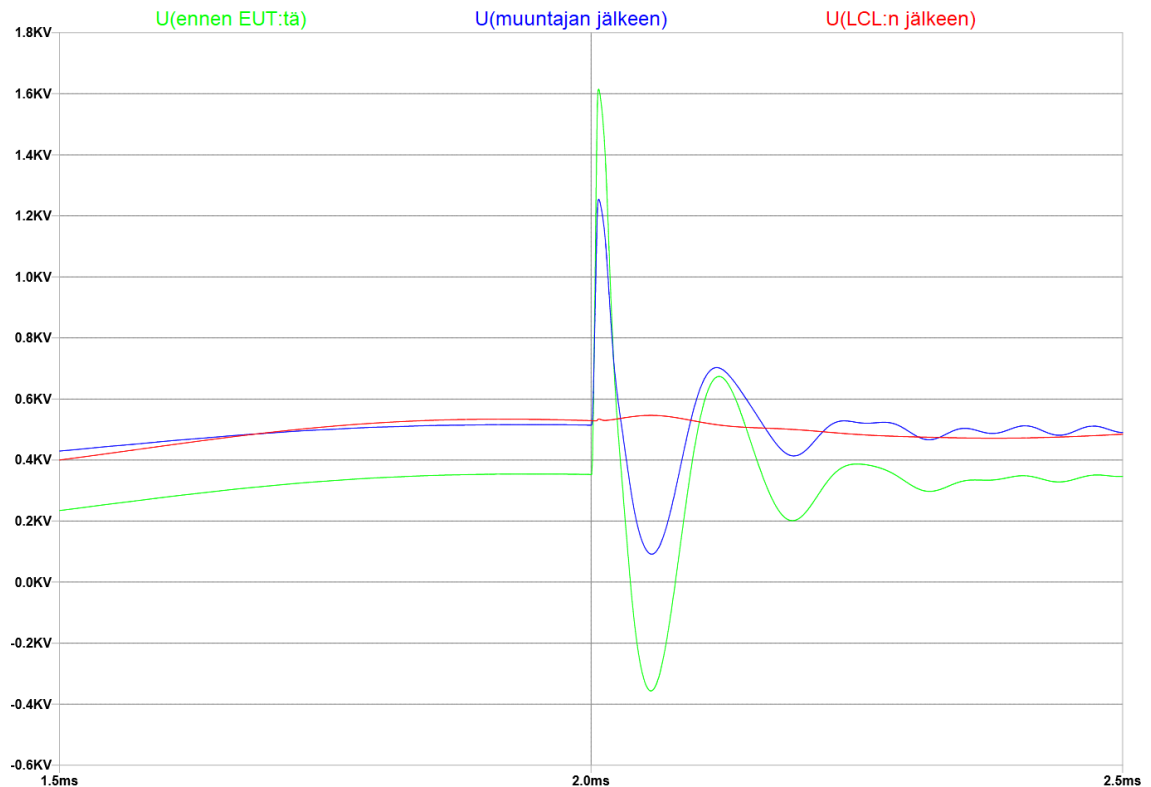
Resonanssia näkyy jännitteissä, kuten pelkillä EMI-suodatinkorteilla simuloitaessa. Resonanssin amplitudi on kuitenkin huomattavasti pienempi, kun ylijännitesuojat ovat lisättyinä.



Kuva 33. EUT:n muuntajan, EMI-suodatinkorttien, ylijännitesuojien sekä LCL:n vaikutus syöksyaaltoon.

Kuvassa 34 on esitetty hetkellinen tapahtuma syöksyaallon vaikutuksesta ennen EUT:tä, muuntajan jälkeen sekä LCL:n jälkeen, lisätyillä EMI-suodatinkorteilla ja ylijännitesuojilla.

Ennen ja jälkeen muuntajan olevissa jännitteissä näkyy resonanssia 16,7 kHz:n taajuudella. Muuntajan jälkeisen resonanssin amplitudi on noin 10 voltia.



Kuva 34. Hetkellinen tapahtuma EUT:n muuntajan, EMI-suodatinkorttien, ylijännitesuojien sekä LCL:n vaikutuksesta syöksyaaltoon.

Syöksyaallon ajoituksen vaikutus resonanssiin

Syöksyaallon amplitudin ennen ja jälkeen muuntajan havaittiin vaihtelevan riippuen syöksyaallon ajoituksesta suhteessa verkon jännitteen hetkeen siniaallossa. Myös resonanssin amplitudi EMI-suodatinkorteilla vaihteli riippuen syöksyaallon ajoituksesta. Näitä vaihteluja testattiin simuloimalla syöksyaalto verkon 20 ms:n pituisen siniaallon eri kohtiin 1 ms:n välein. Simulaatiossa käytettiin suojalaitteina muuntajaa, EMI-suodatinkortteja sekä LCL:ää. Näillä suojalaitteilla oli havaittu resonanssia aiemmin.

Taulukkoon 5 on koottu simulointitulokset. Resonanssia esiintyy yhdellätoista eri ajoituksella. Ajoituksissa joissa resonanssia esiintyy, myös syöksyaallon amplitudit ovat keskimäärin pienemmät. Resonanssitaajuus on aina 16,7 kHz. Suurin, 85 voltin, resonanssin amplitudi on 3003 ms:n ajoituksella.

Taulukko 5. Syöksyaallon ajoituksen vaikutus amplitudeihin ja resonanssiin kytketyillä EMI-suodatinkorteilla.

Syöksyaallon ajoitus simulaation aloituksesta	Syöksyaallon amplitudi ennen muuntajaa	Syöksyaallon amplitudi muuntajan jälkeen	Resonanssin amplitudi
3002 ms	1320 V	770 V	45 V
3003 ms	1230 V	700 V	85 V
3004 ms	1190 V	680 V	80 V
3005 ms	1130 V	650 V	50 V
3006 ms	1110 V	650 V	25 V
3007 ms	1130 V	660 V	10 V
3008 ms	1150 V	690 V	35 V
3009 ms	1170 V	720 V	75 V
3010 ms	1240 V	770 V	80 V
3011 ms	1310 V	780 V	65 V
3012 ms	1430 V	850 V	15 V
3013 ms	1530 V	890 V	-
3014 ms	1550 V	910 V	-
3015 ms	1590 V	940 V	-
3016 ms	1600 V	940 V	-
3017 ms	1590 V	930 V	-
3018 ms	1590 V	930 V	-
3019 ms	1560 V	910 V	-
3020 ms	1520 V	890 V	-
3021 ms	1470 V	840 V	-

EMI-kuristimien simulointi

EMI-kuristimien mallintaminen ei onnistunut. Syitä on analysoitu nopean transienttipurskeen simuloinnin luvussa 5.1.

6 Simulaation verifiointi

6.1 Syöksyaallon mittaus

Testijärjestely

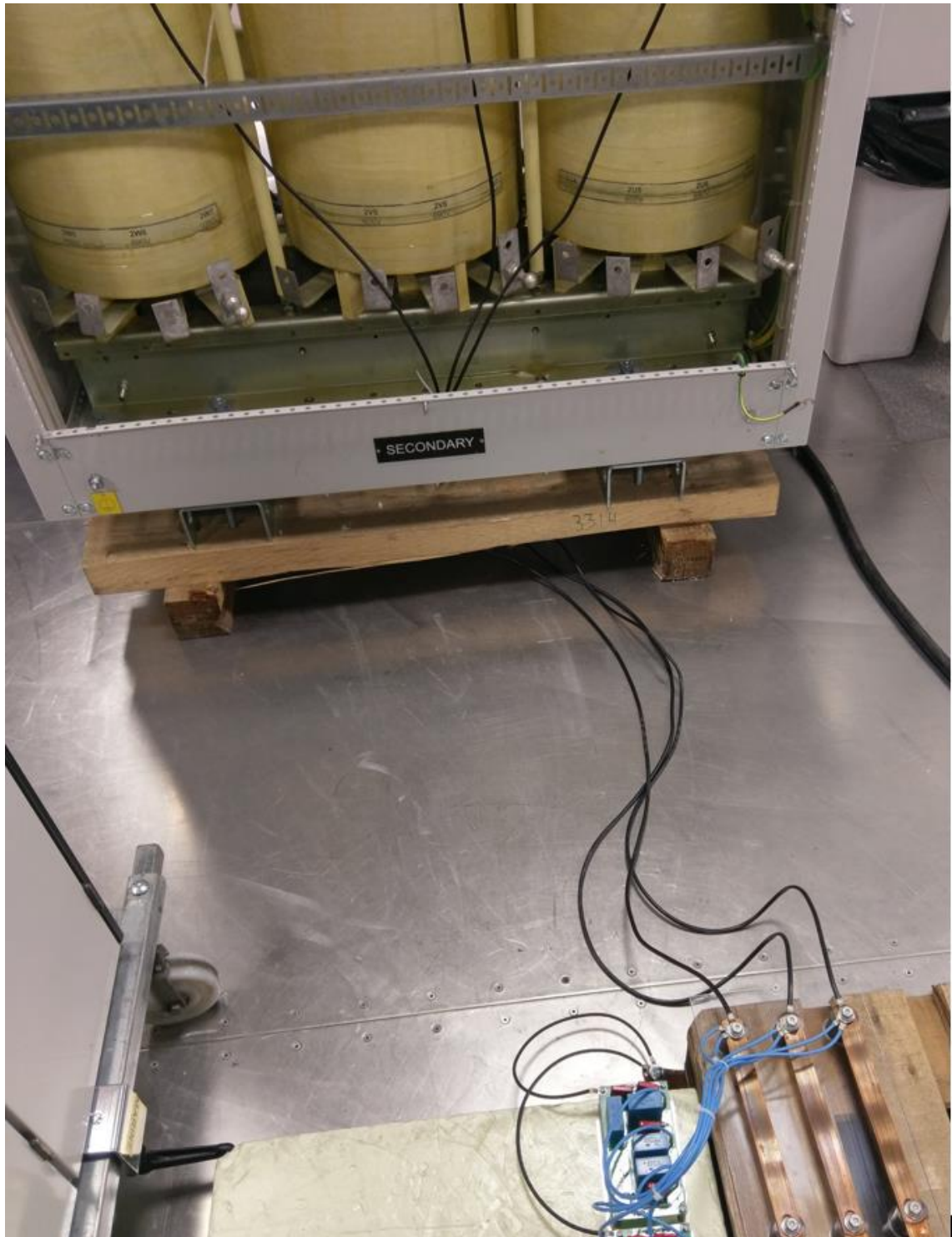
Simuloituja tuloksia haluttiin verrata todellisiin komponentteihin ja mittauksiin. Tätä varten rakennettiin testijärjestely syöksyaallon testiä varten.

Kuvassa 35 on nähtävissä EMC-muuntajan ensiö vasemmalla ja syöksyaaltogeneraattori oikealla.



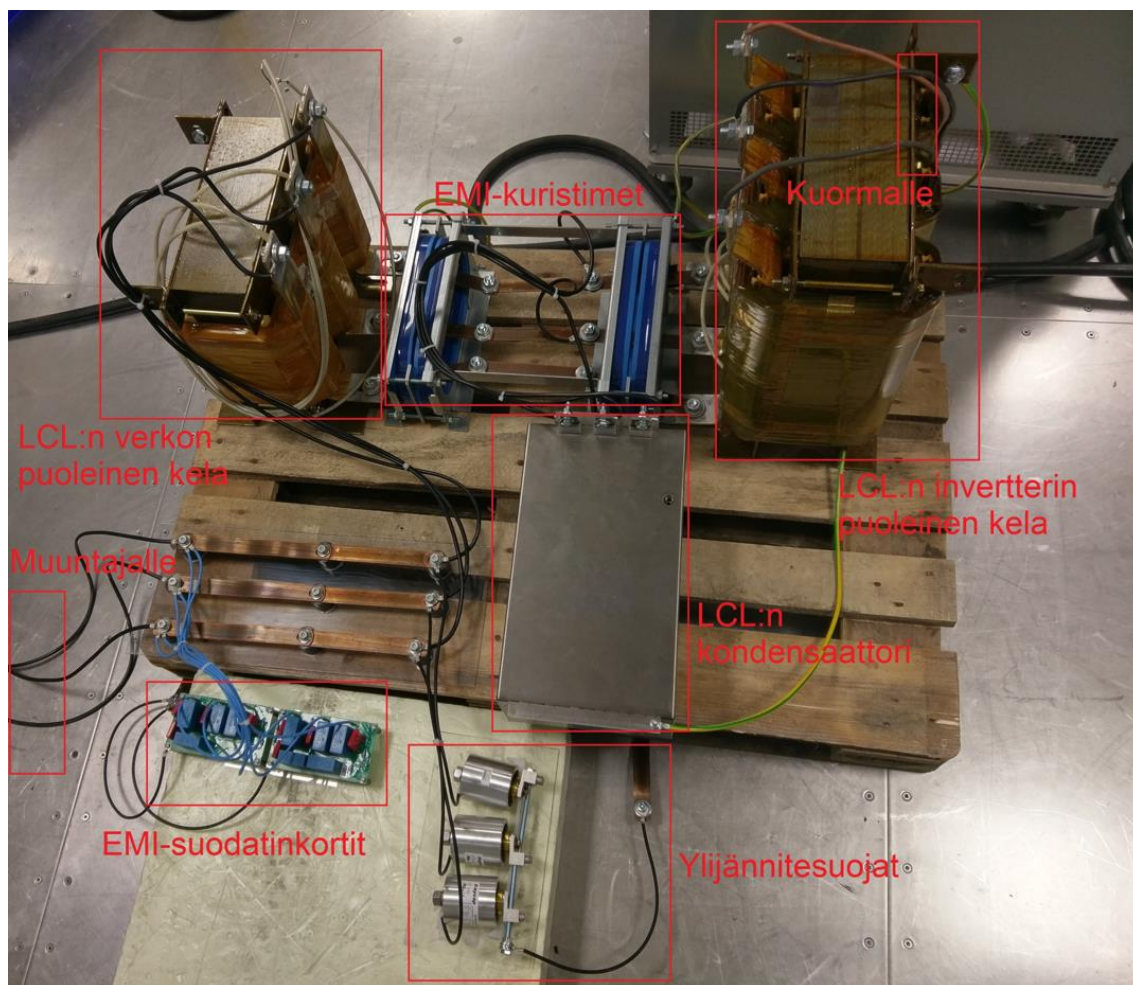
Kuva 35. EMC-muuntajan ensiö ja syöksyaaltogeneraattori.

Kuvassa 36 on näytetty muuntajan toision ja häiriönsuodatusverkon välinen kytkentä.



Kuva 36. EMC-muuntajan toisio ja syöttö häiriönsuodatusverkkoon.

Kuvassa 37 on kuvattuna häiriönsuodatusverkko sisältäen kaikki häiriötä vaimentavat komponentit lukuun ottamatta EMC-muuntajaa.

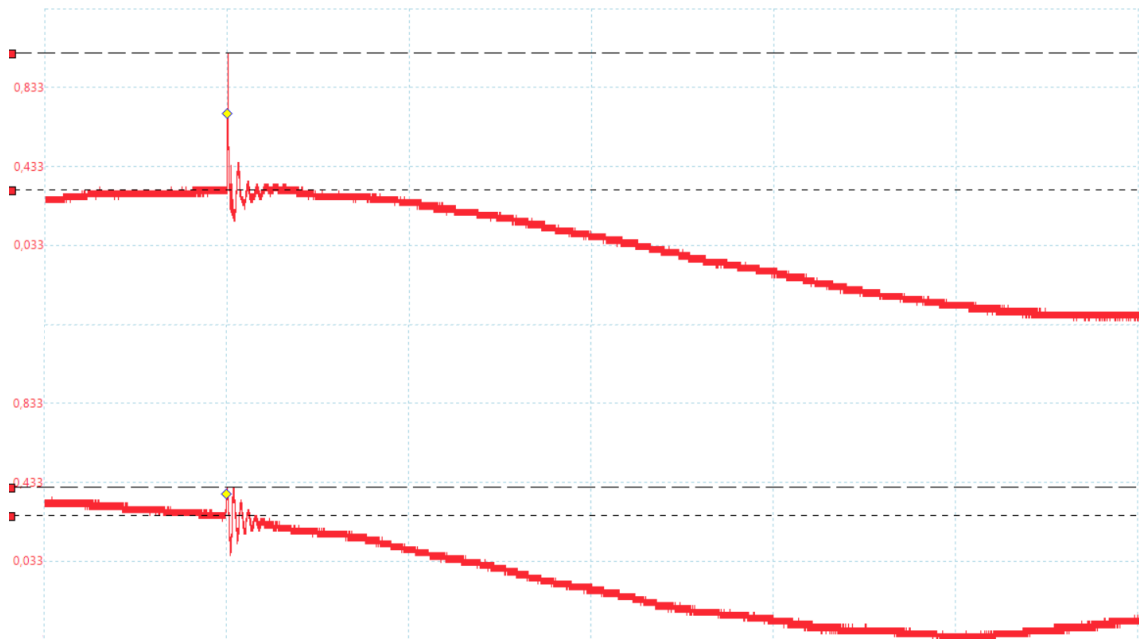


Kuva 37. Häiriönsuodatusverkko.

Testitulokset

Syöksyaallon testissä jännitetasona käytettiin 2 kV vaiheesta maahan. Kuormana käytettiin kolmivaiheista vastuspakettia. Vaihejännitteenä käytettiin 400 voltia. Vaihevirta oli kahdenkymmenen ampeerin luokkaa teknisistä syistä. Testi suoritettiin kahdessa vaiheessa. Ensin tuottamalla syöksyaalto muuntajan ensiöpuolelle, jolla testattiin muuntajan syöksyaallon vaimennus.

Kuvassa 38 on esitetty ylempänä jännitemittaus muuntajan ensiössä ja alempana jännitemittaus muuntajan toisiossa syöksyaallon kohdistuessa muuntajan ensiöön. Syöksyaallon amplitudi siniaaltoon verrattuna muuntajan ensiössä on 693 voltia. Amplitudi muuntajan toisiossa on 144 voltia. Huomioon otettavaa on, että myös EMI-suodatinkortit ja ylijännitesuojat ovat kytkettynä samaan potentiaaliin, josta toision mittaus on otettu.



Kuva 38. Syöksyaalto muuntajan ensiössä ja toisiossa.

Toisessa vaiheessa muuntaja päätettiin ohittaa eli syöksyaalto tuotettiin muuntajan toisiopuolelle. Tässä vaiheessa haluttiin selvittää eri komponenttien vaimennuskykyä, joten mittauksia on otettu useammasta eri paikasta ja lopuksi vielä ilman ylijännitesuojia ja EMI-suodatinkortteja. Taulukkoon 6 on koottu mittaustulokset.

Taulukko 6. Muuntajan toisioon tuotetun syöksyaallon jännitteen amplitudi eri suojalaitteiden vaikutuksen jälkeen.

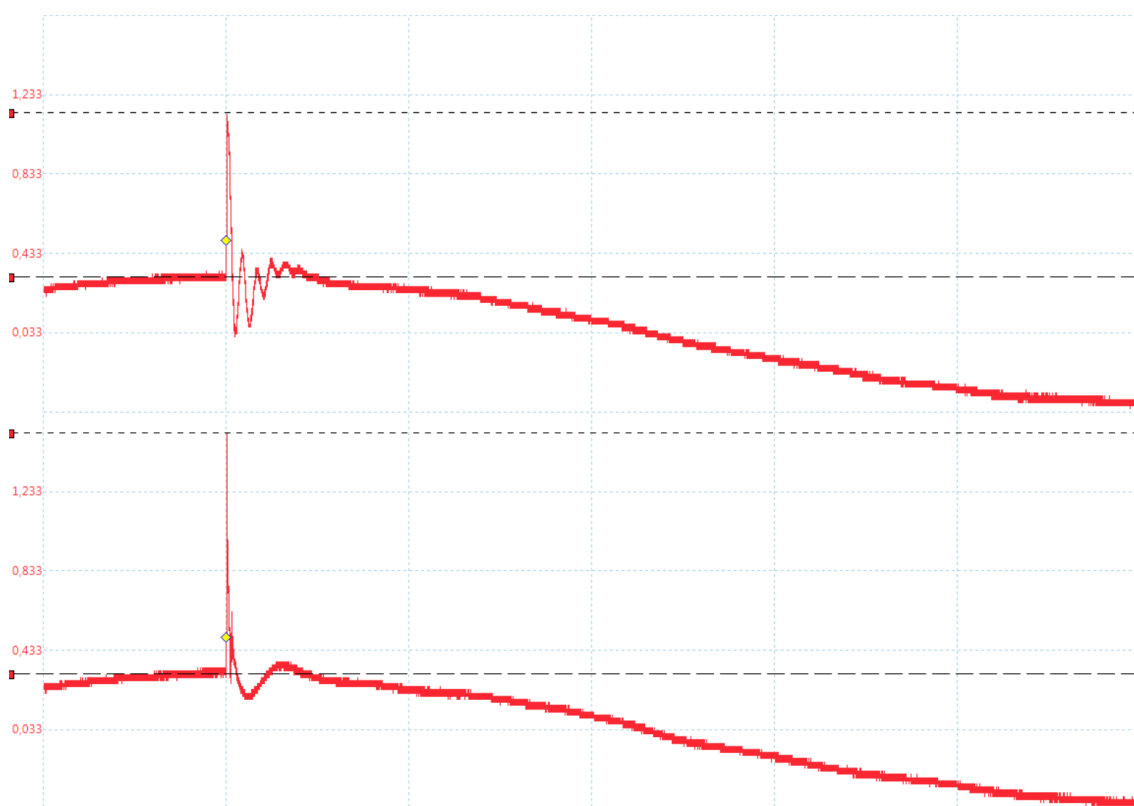
Mittauspaikka	Poistettut suojalaitteet	Jännitteen amplitudi
Muuntajan toisio	-	975 V
LCL:n verkonpuoleisen kelan vaikutuksen jälkeen	-	807 V
LCL:n invertterinpuoleisen kelan vaikutusta ennen	-	797 V
Suojalaitteiden jälkeen	-	797 V
Suojalaitteiden jälkeen	Ylijännitesuojat	827 V
Suojalaitteiden jälkeen	Ylijännitesuojat ja EMI-suodatinkortit	1213 V

Mittausten perusteella verkonpuoleinen kela sekä EMI-suodatinkortit vaimentavat merkittävästi syöksyaallon amplitudia.

Ylijännitesuojat eivät vaikuta paljoa syöksyaallon vaimennukseen, vaikka käyttötarkoitukseltaan niiden tulisi olla merkittävät suojalaitteet. Syöksyaallon amplitudi ei testissä välttämättä riitä ylittämään ylijännitesuojien varistorien kynnystä.

LCL vaimentaa mittauksissa syöksyaaltoa vain lievästi toisin kuin simulaatiossa, jossa syöksyaalto vaimeni täysin. Simulaation suuri vaihevirta, joka on 25-kertainen mittauksiin verrattuna, vaikuttaa mahdollisesti vaimennusmäärään.

EMI-suodatinkortit vaikuttavat vaimentamisen lisäksi syöksyaallon pulssimuotoon. Kuvassa 39 on taulukon 6 mukaiset kaksi viimeistä mittausta. EMI-suodatinkortit vaimentavat amplitudia merkittävästi. Kuvasta nähdään kuitenkin, että EMI-suodatinkortit aiheuttavat syöksyaallon resonointia pienen hetken ajan. Simulaatiossa EMI-suodatinkortit aiheuttivat samaa ilmiötä joissain liipaisukohdissa. Simulaation resonanssi kuitenkin vaimeni huomattavasti hitaammin.

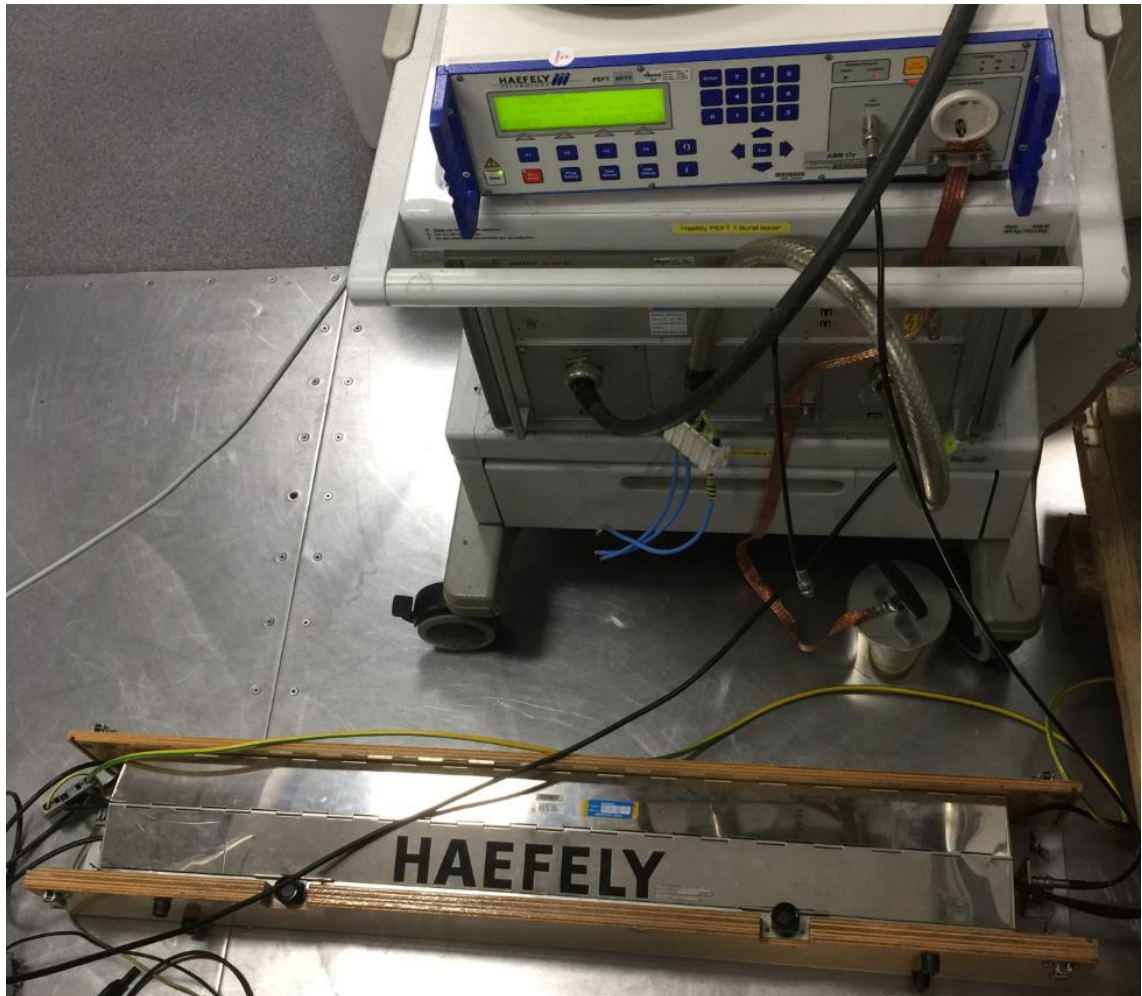


Kuva 39. EMI-suodatinkorttien poiston vaikutus syöksyaaltoon.

6.2 Nopean transienttipurskeen mittaus

Testijärjestely

Nopean transienttipurskeen testiä varten testijärjestelyä muutettiin. Testijärjestely oli vastaava kuin syöksyaallon testissä, lukuun ottamatta häiriögeneraattoria. Nopean transienttipurskeen testissä on käytössä transienttipurskeen generaattori, joka kytkeytyy kapasitiivisen levyn kautta testilaitteeseen. Kuvassa 40 on nähtävissä ylhäällä transienttipurskeen generaattori ja alhaalla kapasitiivinen kytkentälevy.

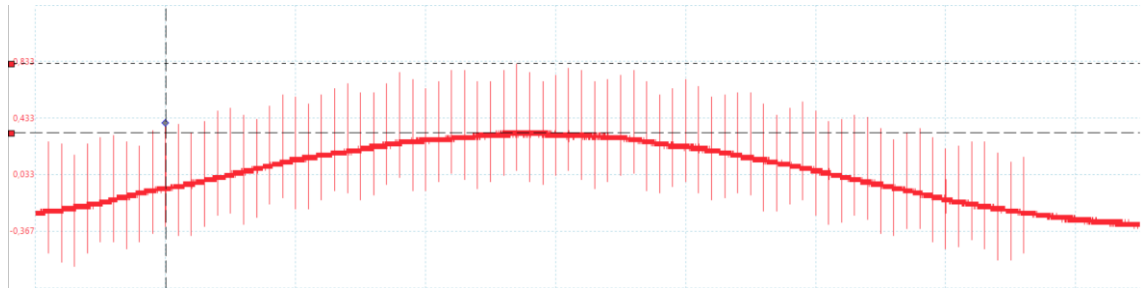


Kuva 40. Transienttipurskeen generaattori ja kapasitiivinen kytkentälevy.

Testitulokset

Transienttipurskeen testin jännitetasona käytettiin 2 kV. Transienttipurskeen testi suoritettiin, kuten syöksyaallon testi, kahdessa vaiheessa. Ensin mitattiin muuntajan vaikutus.

Kuvassa 41 on nähtävissä transienttipurske muuntajan ensiöön. Transienttipurskeen amplitudi suhteessa siniaaltoon on muuntajan ensiössä 490 volttia. Muuntaja vaimentaa transienttipurskeen amplitudin 396 volttiin.



Kuva 41. Transienttipurske muuntajan ensiössä.

Toisessa vaiheessa transienttipurske tuotettiin muuntajan toisiopuolelle. Mittauspaikat ovat vastaavat kuin syöksyaallon testissä. Taulukossa 7 on nähtävissä mittaustulokset.

Taulukko 7. Muuntajan toisioon tuotetun transienttipurskeen jännitteen amplitudi eri suojalaitteiden vaikutuksen jälkeen.

Mittauspaikka	Poistettut suojalaitteet	Jännitteen amplitudi
Muuntajan toisio	Ylijännitesuojat ja EMI-suodatinkortit	728 V
Muuntajan toisio	-	564 V
LCL:n verkonpuoleisen kelan vaikutuksen jälkeen	-	525 V
LCL:n invertteripuoleisen kelan vaikutusta ennen	-	510 V
Suojalaitteiden jälkeen	-	510 V
Suojalaitteiden jälkeen	EMI-suodatinkortit	688 V
Suojalaitteiden jälkeen	Ylijännitesuojat ja EMI-suodatinkortit	708 V

Mittausten perusteella kaikki komponentit invertterin puoleista kelaa lukuun ottamatta vaikuttavat transienttipurskeen amplitudiin jonkin verran. Suurin vaikutus on kuitenkin EMI-suodatinkorteilla. Pulssimuodot ovat kaikissa mittauksissa samantyyppisiä, joten näistä ei ole erikseen esitetty kuvia vaan kuva 41 kuvaa hyvin kaikkien mittausten pulssimuotoa.

LCL vaimentaa myös transienttipurskeen mittauksissa vain lievästi jännitteen amplitudia toisin kuin simulaatiossa. Vaikutus voi liittyä mahdollisesti vaihevirtaan tässäkin testissä.

7 Yhteenveto

Insinööriytyön tavoitteena oli simuloimalla selvittää eri suojalaitteiden vaikutus häiriösignaaliin.

Simulointiohjelman kanssa oli paljon ongelmia, joista suurin osa pystyttiin joko ratkaisemaan tai kiertämään.

Suojalaitteiden toiminnan simulointi nopean transienttipurskeen testissä sekä syöksyaallon testissä onnistui.

Aurinkosähköinvertterin ja verkon välissä oleva muuntaja vaimentaa kaikkien transienttihäiriötyyppien amplitudia. Koska simulaatiossa käytettiin EMC-muuntajaa joka ei muuta jännitteen tasoa, lisätutkimuksen kohteena voisi olla keskijännitteen pienjännitteeksi muuntavan muuntajan häiriönvaimennus.

EMI-suodatinkortit suojaavat aurinkosähköinvertteriä nopean transienttipurskeen kaltaisilta häiriöiltä. EMI-suodatinkortit voivat kuitenkin aiheuttaa resonanssia verkkoon sekä muille suojalaitteille altistuessaan syöksyaallon kaltaisille häiriöille. Koska EMI-suodatinkortit eivät aiheuta resonanssia syöksyaallon osuessa tietyissä kohdissa syöttöjännitteen siniaaltoa, tämän ilmiön syiden lisäselvitys voisi olla kiinnostavaa.

Ylijännitesuojat suojaavat aurinkosähköinvertteriä syöksyaallon kaltaisilta häiriöiltä vaimentamalla häiriöiden amplitudia. Ylijännitesuojat aiheuttavat suuritaajuista resonanssia verkkoon sekä muille suojalaitteille altistuessaan nopean transienttipurskeen kaltaisille häiriöille.

EMI-suodatinkorttien sekä ylijännitesuojien yhteistoiminta minimoi häiriövaikutukset sekä nopean transienttipurskeen, että syöksyaallon kaltaisilta häiriöiltä.

LCL:n vaikutus suojalaitteena on suurin ja se vaimentaakin erilaiset transienttihäiriöt täysin.

EMI-kuristimia ei pystytty simuloimaan. Simulaatiomallin ominaisuuksien analysointia tai tarkempien tietojen kysymistä valmistajalta voi miettiä jatkossa.

Mittausten perusteella simulaatiomalli on suuntaa antava. Simulaation suorittaminen pienemmällä vaihevirralla ja komponenttien sisäisten resistanssien säätämisellä voidaan jatkossa yrittää saavuttaa mitatut tulokset.

Simulaatiomallia voidaan käyttää jatkossa alustavaan suojalaitteiden toiminnan tutkimiseen ja verifiointiin ennen varsinaisia testejä.

Lähteet

- 1 Heikkinen, Pauli. 2009. Maxwellin yhtälöt. Verkkoaineisto. <<http://users.jyu.fi/~pheikkin/fysa220/sms1.pdf>>. Luettu 25.9.2017.
- 2 Williams, Tim. 2006. EMC for Product Designers.
- 3 EMI Electromagnetic Interference Basics. Ei julkaisuvuotta. Verkkoaineisto. Radio-Electronics.com. <<http://www.radio-electronics.com/info/circuits/emc-emi/electromagnetic-interference-basics-tutorial.php>>. Luettu 25.9.2017.
- 4 EMC - sähkömagneettinen yhteensopivuus. 2014. Verkkoaineisto. Tukes. <<http://www.tukes.fi/fi/Kuluttajille/Koti-ja-kodin-tekniikka/EMC---sahkomagneettinen-yhteensopivuus/>>. Luettu 25.9.2017.
- 5 A Beginner's Guide To EMC, Chapter 3: Continuous & Transient Immunity. 2015. Verkkoaineisto. EMC Fastpass. <<https://www.emcfastpass.com/emc-testing-beginners-guide/emc-immunity-testing/>>. Luettu 13.10.2017.
- 6 IEC. 2012. IEC 61000-4-4. Standardi.
- 7 IEC. 2014. IEC 61000-4-5. Standardi.
- 8 Application & installation guidelines. 2013. Verkkoaineisto. Raycap. <<http://www.raycap.com/wp-content/uploads/2014/08/Application-Installation-Guidelines-Rayvoss.pdf>>. Luettu 25.9.2017.
- 9 A. Reznik, M. Godoy Simões, Ahmed Al-Durra, S. M. Muyeen. Ei julkaisuvuotta. LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems. Verkkoaineisto. <http://inside.mines.edu/~msimoes/documents/paper_54.pdf>. Luettu 25.9.2017.
- 10 Xiongfei Wang, Frede Blaabjerg, Poh Chiang Loh. 2014. Virtual RC Damping of LCL-Filtered Voltage Source Converters with Extended Selective Harmonic Compensation. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/profile/Xiongfei_Wang/publication/266770461_Virtual_RC_Damping_of_LCL-Filtered_Voltage_Source_Converters_With_Extended_Selective_Harmonic_Compensation/links/543bab9f0cf24a6ddb9782ba/Virtual-RC-Damping-of-LCL-Filtered-Voltage-Source-Converters-With-Extended-Selective-Harmonic-Compensation.pdf>. Luettu 25.9.2017.

Pulssimuodon funktion määrittäminen

Sähköisten nopeiden transienttien generaattorin sekä syöksyaaltogeneraattorin tuottamat sähköiset pulssit on määritetty samalla yhtälöllä. Ainoastaan parametrien arvot vaihtelevat riippuen generaattorista ja onko kyseessä jännite- vai virtapulssi. Tämä sähköisten pulssien yhtälö on määritetty seuraavasti:

$$v(t) = k_v \left[\frac{v_1}{k} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right] \quad (5)$$

missä

$$k = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \left(\frac{n \cdot \tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (6)$$

Sähköisten nopeiden transienttien generaattorilla parametrit ovat [5, s. 14]:

$$v_1 = 0,92 \quad \tau_1 = 3,5 \text{ ns} \quad \tau_2 = 51 \text{ ns} \quad n_{EFT} = 1,8$$

k_v on avoimen piirin jännitteen huippuarvo ($k_v = 1$ tarkoittaa normalisoitunutta jännitettä).

Syöksyaaltogeneraattorin syöksyjännitteellä parametrit ovat [6, s. 54]:

$$k_v = 1 \quad v_1 = 0,94 \quad \tau_1 = 0,356 \text{ } \mu\text{s} \quad \tau_2 = 65,845 \text{ } \mu\text{s} \quad n = 1,852$$

Syöksyaaltogeneraattorin syöksyvirralla muutetaan yhtälössä $v(t)$:n tilalle $I(t)$, k_v :n tilalle k_i sekä v_1 :n tilalle i_1 . Parametrit syöksyvirralla ovat [6, s. 56]:

$$k_i = 1 \quad \tau_1 = 47,52 \text{ } \mu\text{s} \quad \tau_2 = 4,296 \text{ } \mu\text{s} \quad i_1 = 0,939 \quad n = 2,74$$